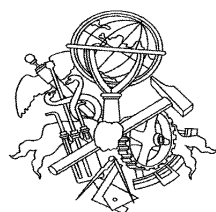


BANCO DE ENSAIOS PARA MICRO GERAÇÃO EÓLICA

Luís Carlos Aguiar Santos



Departamento de Engenharia Electrotécnica

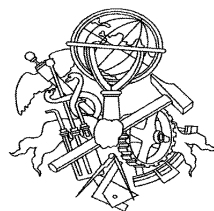
Instituto Superior de Engenharia do Porto

2010

Este relatório satisfaz, parcialmente, os requisitos que constam da Ficha de Disciplina de
Tese/Dissertação, do 2º ano, do Mestrado em Engenharia Electrotécnica e de
Computadores

Candidato: Luís Carlos Aguiar Santos, N° 1050380, 1050380@isep.ipp.pt

Orientação científica: Doutor José Ricardo Teixeira Puga, JTP@isep.ipp.pt



Departamento de Engenharia Electrotécnica
Instituto Superior de Engenharia do Porto

16 de Novembro de 2010

Agradecimentos

Agradeço ao GECAD e ao laboratório de metrologia do Departamento de Engenharia Electrotécnica do ISEP o facto de terem facultado o equipamento necessário à realização deste trabalho.

Agradeço também ao Doutor José Ricardo Teixeira Puga, meu orientador, pelo constante acompanhamento proporcionado, sempre atento, dando ao mesmo tempo espaço suficiente para que pudesse evoluir ao meu ritmo.

A Todos o meu,

Muito Obrigado!

Resumo

O crescimento da utilização da energia eléctrica nos últimos dois séculos levou ao desenvolvimento de várias tecnologias de produção de energia. Devido a factores económicos e ambientais, as tecnologias que usam energias renováveis têm vindo a evoluir bastante nas últimas décadas. A energia eólica representa hoje 9% de toda a energia produzida na Europa, percentagem essa que se encontra em constante crescimento. A micro produção eólica é também hoje uma realidade, pois além de rentável economicamente, diminui o consumo da energia da rede eléctrica. Todos estes factores são motivantes para o desenvolvimento deste tipo de energia.

O presente documento reflecte todo um trabalho de pesquisa, estudo e desenvolvimento de um banco de ensaios de micro geração eólica. Este consiste no cálculo do binário que uma determinada turbina faria em determinadas condições de vento, rotação e carga, baseado nos princípios físicos de funcionamento das turbinas eólicas. Depois do cálculo é transmitido esse binário ao gerador por meio de um motor eléctrico.

Desenvolveu-se uma função de análise de resultados das simulações realizadas no banco de ensaios. Esta apenas analisa os resultados referentes às turbinas eólicas, não fazendo parte da análise todos os dados referentes aos geradores.

Realizaram-se ensaios de turbinas com características distintas e diferentes tamanhos para diferentes situações de vento e carga. Os resultados desses ensaios mostram que é possível simular múltiplas situações obtendo resultados consistentes, ao mesmo tempo que se verificam e comprovam os princípios físicos da energia eólica. Com eles, foi possível testar e validar todo o projecto desenvolvido.

Palavras-Chave

Energia eólica, micro produção, turbina eólica, vento, potência, binário, Limite de Betz, coeficiente de potência, coeficiente de binário, *TIP Speed Ratio*.

Abstract

The growth in use of the electrical energy in the last two centuries led to the development of various energy production technologies. Due to economic and environmental factors the technologies that use renewable energies sources have evolved considerably in the recent decades. The wind energy represents nowadays 9% of all the produced energy in the Europe, percentage that is growing constantly. The micro wind production is also today a reality, as well as profitable decreases the energies' consume of the electrical net. All these factors are motivating the development of this kind of energy.

This project reflects a complete research work, study and development of a test bank of micro wind generation. This consisted in calculating the torque that a particular turbine would have in certain wind conditions, rotation and load, based in the physical principles of wind turbine's operation. After the calculus, that torque is transmitted to the generator by an electric motor.

A function of results' analyzes of the realized simulations in the test bank is developed. This only analyzes the results referent to the wind turbines, not being part of the analysis all the generator's data.

Turbine's tests with distinct characteristics and different sizes for different situations of wind and load are performed. The results of that tests permit to show the possibility of simulate multiples situations getting coherent results, while verify and prove of the physical principles of the wind energy. With that, test and validate all the developed project was possible.

Key-words

Wind energy, micro production, wind turbine, wind, power, torque, Betz' Law, power coefficient, torque coefficient, TIP Speed Ratio.

Índice

AGRADECIMENTOS.....	I
RESUMO	III
ABSTRACT	V
ÍNDICE	VII
ÍNDICE DE FIGURAS.....	IX
ÍNDICE DE TABELAS	XIII
ACRÓNIMOS	XV
1. SÍNTESE	1
1.1. MOTIVAÇÃO E OBJECTIVO	2
1.2. ORGANIZAÇÃO DO RELATÓRIO	3
2. PERSPECTIVA HISTÓRICA.....	5
2.1. CONTEXTUALIZAÇÃO	5
2.2. CENÁRIO DA ENERGIA EÓLICA NA EUROPA	13
3. FUNDAMENTOS TEÓRICOS	15
3.1. TURBINA EÓLICA	16
3.2. VENTO	29
3.3. MOTOR DE CORRENTE CONTÍNUA	29
3.4. MECÂNICA.....	33
4. BANCO DE ENSAIOS DESENVOLVIDO	35
4.1. ARQUITECTURA DO BANCO DE ENSAIOS	36
4.2. FERRAMENTAS DE DESENVOLVIMENTO	37
4.3. SOFTWARE DESENVOLVIDO	38
4.4. HARDWARE DESENVOLVIDO	55
5. ANÁLISE PRÁTICA E VALIDAÇÃO DO BANCO DE ENSAIOS	59
5.1. ENSAIOS DE UMA TURBINA PERANTE DIFERENTES CARGAS	60
5.2. ENSAIO DE UMA TURBINA PERANTE VENTO VARIÁVEL	63
5.3. ENSAIO DE TURBINAS DIFERENTES COM O MESMO RAIO	65
5.4. ENSAIO DE TURBINAS DE DIFERENTE TIPO E RAIO	67
5.5. ANÁLISE GERAL.....	69
6. CONCLUSÕES	71
REFERÊNCIAS DOCUMENTAIS.....	75

ANEXO A. ESTRUTURA DO FICHEIRO “.TXT” DO VENTO.....	77
ANEXO B. ESTRUTURA DO FICHEIRO “.TXT” DA TURBINA.....	79
ANEXO C. CÓDIGO DA FUNÇÃO “TURBINA” NO MATLAB	81

Índice de Figuras

Figura 1	Diagrama de blocos do banco de ensaios de micro geração eólica desenvolvido.....	2
Figura 2	Primeira central hidroelétrica, no rio Fox em Appleton, Wisconsin, 1882 [2].....	6
Figura 3	Charles Francis Brush, nascido em Euclid, Ohio, Estados Unidos, 1849-1929 (Figura A) [3]. A primeira turbina eólica para produção de energia elétrica, construída por Charles F. Brush, em 1888 (Figura B) [3].	7
Figura 4	Poul La Cour, Dinamarca, 1846-1908 (Figura A) [5]. Turbina eólica para produção de energia elétrica, em Askov, Dinamarca, 1891 (Figura B) [5].	8
Figura 5	Ulrich Hütter, Alemanha 1910 – 1989 (Figura A) [5]. Eólica W-34, rotor de 34 m de diâmetro e uma potência de 100 kW (Figura B) [5].	9
Figura 6	Turbina Enercon GmbH de 6 MW (Figura A) [5]. Parque eólico Horns Rev, a cerca de 20 km da costa da Dinamarca com uma capacidade de 160 MW (Figura B) [7].	10
Figura 7	Turbina flutuante, EDP e Principle Power. Projecto WindFloat [9].	11
Figura 8	Micro turbina eólica Air Breeze de 200 W [10].	12
Figura 9	Total de energia eólica instalada até fim de 2009 na Europa em MW [11].	13
Figura 10	Comparação da energia elétrica produzida na União Europeia nos anos 2000 e 2009. 14	
Figura 11	Novas instalações em 2009 na União Europeia [11].	14
Figura 12	Alguns exemplos de tipos de turbinas de eixo vertical [13].	16
Figura 13	Turbina de grande produção Vestas de 3 MW (Figura A) [14]. Micro turbina Air Breeze de 200 W (Figura B) [15].	17
Figura 14	Albert Betz, Alemanha 1885 – 1968 [5].	18
Figura 15	Condições de escoamento devido à extracção de energia mecânica de um fluxo de corrente de ar livre, de acordo com a teoria de Betz [13].	20
Figura 16	Representação gráfica do coeficiente de potência ideal, C_p , em função do ratio da velocidade do fluxo de ar à frente, e atrás, do conversor, respectivamente, v_1 e v_2	23
Figura 17	Esquema de um conversor de energia eólica de arrasto puro e descrição das forças envolvidas [13].	24
Figura 18	Esquema das forças aerodinâmicas que actuam numa asa de um avião [13].	25
Figura 19	Esquema de um conversor de energia eólica por sustentação e descrição das forças envolvidas [13].	26
Figura 20	Coeficientes de potência, C_p , de referência, para diferentes tipos de conversores eólicos em função do <i>TIP Speed Ratio</i> λ [13].	27
Figura 21	Coeficientes de binário, C_M , de referência, para diferentes tipos de conversores eólicos em função do <i>TIP Speed Ratio</i> λ [13].	28

Figura 22	Funcionamento básico de um motor de corrente contínua de íman permanente de dois pólos. A repulsão de pólos iguais (Figura A), instante intermédio (Figura B) e último instante (Figura C) antes da troca de polarização, que coloca o sistema na situação inicial (Figura A) [17].	31
Figura 23	Circuito equivalente de um motor CC de íman permanente [16].	31
Figura 24	Diagrama de blocos do banco de ensaio desenvolvido.	35
Figura 25	Representação de um gerador eólico com a estrutura comum de funcionamento.	36
Figura 26	Representação da arquitectura do banco de ensaios de micro geradores eólicos desenvolvido, apresentando os principais componentes.	37
Figura 27	Imagem da interface gráfica desenvolvida em C++, correspondente ao instante inicial.	39
Figura 28	Mensagem de “ERRO” de inexistência do ficheiro da turbina (Figura A). Mensagem de “ERRO” da estrutura do ficheiro do vento (Figura B). Aspecto normal da simulação (Figura C). Mensagem de “ALARME” da velocidade máxima do motor CC do simulador atingida (Figura D).	41
Figura 29	Fluxograma do funcionamento do código C++ da aplicação desenvolvida.	43
Figura 30	Ensaio do motor CC variando a corrente linearmente em 300s.	47
Figura 31	Ensaio do motor CC com corrente constante de 1A, corrente em função do tempo.	48
Figura 32	Ensaio do motor CC com corrente constante de 1A, velocidade angular em função do tempo.	49
Figura 33	Janela “Análise geral”, da função “turbina” no Matlab.	52
Figura 34	Janela “Características da turbina”, da função “turbina” no Matlab.	53
Figura 35	Janela “Atritos e inércias”, da função “turbina” no Matlab.	53
Figura 36	Janela “Controlo de corrente”, da função “turbina” no Matlab.	54
Figura 37	Janela “Tempo de ciclo e encoder”, da função “turbina” no Matlab.	54
Figura 38	Esquema do circuito de controlo desenvolvido.	56
Figura 39	Curvas dos coeficientes de binário e potência da turbina A em função do <i>TIP Speed Ratio</i> .	60
Figura 40	Binário máximo e potência máxima da turbina A em função do <i>TIP Speed Ratio</i> .	61
Figura 41	Resultados da simulação da turbina A para velocidade do vento de 12.5 m/s para três cargas diferentes. <i>TIP Speed Ratio</i> , binário e potência.	62
Figura 42	Velocidade do vento em função do tempo utilizado no ensaio da turbina A.	63
Figura 43	Resultados da simulação da turbina A com raio de 0.325 m perante velocidade de vento variável para três cargas diferentes. <i>TIP Speed Ratio</i> , coeficiente de potência e potência.	64
Figura 44	Coeficientes de binário e de potência das A e B.	65
Figura 45	Resultados de simulação para as turbinas A e B perante variação linear da velocidade do vento e para a carga intermédia.	66
Figura 46	Curvas dos coeficientes de binário e de potência das turbinas A e C e respectivas potências geradas.	67

Figura 47	Resultados da simulação da turbina A e da turbina B perante variação linear da velocidade do vento e para a carga intermédia.....	68
-----------	---	----

Índice de Tabelas

Tabela 1	Ensaio do motor CC do banco de ensaios em vazio	46
----------	---	----

Acrónimos

MEEC – Mestrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores

DEE – Departamento de Engenharia Electrotécnica

ISEP – Instituto Superior de Engenharia do Porto

NASA – National Aeronautics and Space Administration

TEEV – Turbina eólica de eixo vertical

TEEH – Turbina eólica de eixo horizontal

CC – Corrente contínua

CA – Corrente alternada

SI – Sistema Internacional de Unidades

1. SÍNTESE

Este documento descreve o trabalho de estudo e desenvolvimento de um banco de ensaios de micro geradores eólicos. O mesmo foi elaborado no âmbito da Tese/Dissertação, do 2º ano do Mestrado em Engenharia Electrotécnica e Computadores (MEEC), do Departamento de Engenharia Electrotécnica (DEE), do Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP).

Inicialmente, mostrou-se indispensável uma pesquisa e estudo para obter e consolidar conhecimentos em diversos temas, tais como: turbinas eólicas; vento; controlo de binário de um motor de corrente contínua; linguagens de programação; etc... Depois da apreensão de todos esses fundamentos, partiu-se para o desenvolvimento do banco de ensaios. Para uma percepção rápida da estrutura do base do banco de ensaios desenvolvido, representa-se na Figura 1 um diagrama de blocos.

O banco de ensaios é complementado com um programa de análise dos dados referentes à simulação da turbina e de todas as variáveis internas do banco de ensaios. Todos os testes referentes ao gerador não fazem parte deste trabalho. Apenas se usou um gerador acoplado ao banco de ensaios para teste e validação do projecto, comprovando-se assim, a sua coerência e bom funcionamento.

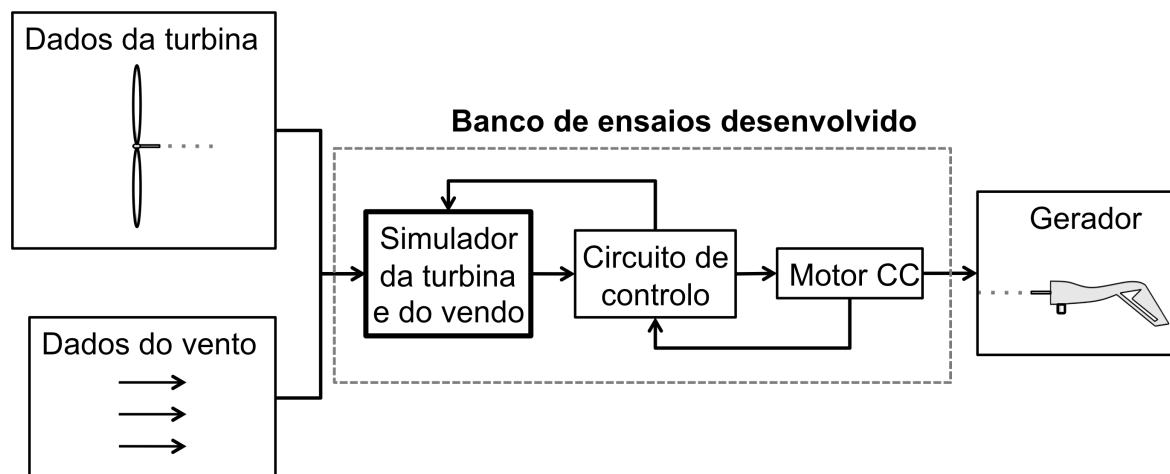


Figura 1 Diagrama de blocos do banco de ensaios de micro geração eólica desenvolvido.

1.1. MOTIVAÇÃO E OBJECTIVO

O destino do planeta e da nossa própria existência está nas nossas mãos. Quer-se com isto dizer que, cabe-nos a nós, ser Humano, dirigir o imparável desenvolvimento tecnológico para que o impacto desse na natureza seja nulo ou o mais suave possível. Assim, toda a tecnologia que se mostra capaz de actuar sem sacrificar o ambiente em pró do ser Humano, substituindo integralmente ou parcialmente outras tecnologias, que apesar da sua eficácia são também destruidoras, deverá ser sempre apoiada e desenvolvida.

A energia eólica, além do seu impacto ambiental quase nulo, tem-se mostrado também uma tecnologia muito interessante do ponto de vista económico. Como a energia eólica é uma energia renovável, a sua matéria-prima não envolve qualquer custo económico. Facto esse, que neste momento de crise geral, é um grande incentivo à sua rentabilização. A sua implementação em grande escala, tanto em parques eólicos como em micro produção particular, ajudará a diminuir a necessidade de produção de energia a partir de fontes não renováveis e de forte impacto ambiental. Visto por este prisma, a energia eólica é uma tecnologia a desenvolver e a aperfeiçoar.

O presente trabalho vem no seguimento desta ordem de ideias. O seu objectivo é o desenvolvimento de um banco de ensaios para micro geradores eólicos. Este deverá simular o binário produzido por uma determinada turbina, em determinadas condições, e aplicar esse binário ao gerador. Tornará assim possível o teste e análise de um gerador em laboratório como se estivesse conectado a uma turbina de vento. Para a aplicação desse binário ao gerador poderá utilizar-se um actuador, como por exemplo, um motor eléctrico.

1.2. ORGANIZAÇÃO DO RELATÓRIO

Todo o trabalho realizado descrito neste documento, depois deste capítulo de síntese, encontra-se estruturado da seguinte maneira:

- no capítulo 2, encontra-se a perspectiva histórica. Nele, contextualiza-se o aparecimento das primeiras eólicas e a sua constante evolução até ao presente. Compara-se a energia eólica com outros tipos de energia na produção de energia eléctrica, salientando o seu crescimento nos últimos anos;
- no capítulo 3, apresenta-se todo o estudo teórico efectuado. Este vai desde o estudo dos tipos de turbinas e dos seus princípios físicos de funcionamento até um breve estudo sobre o vento, passando pelo controlo de binário num motor de corrente contínua e pela expressão mecânica do binário resultante;
- no capítulo 4, realiza-se o desenvolvimento do banco de ensaios. Depois de um esquema da estrutura física do banco de ensaios descreve-se todo o *hardware* e *software* utilizados. Seguidamente, descreve-se todo o desenvolvimento do *software*, começando pelo código da aplicação em C++ e a sua interface gráfica e terminando com a função de análise gráfica dos dados em Matlab. Por fim, apresenta-se o esquema eléctrico utilizado no controlador desenvolvido e explica-se o seu funcionamento;
- no capítulo 5, apresentam-se alguns ensaios realizados para teste e validação de todo o projecto. São abordadas várias turbinas perante diferentes condições de vento e carga;
- no capítulo 6, retiram-se algumas conclusões relevantes para a avaliação do trabalho desenvolvido e faz-se o balanço do trabalho;
- por fim, encontram-se as importantes referências documentais e alguns anexos.

Segue-se então a perspectiva histórica.

2. PERSPECTIVA HISTÓRICA

A percepção histórica do desenvolvimento de mecanismos para produção de energia eléctrica nos últimos dois séculos, assim como da sua eficiência e impacto ambiental, é deveras importante para desenvolvimentos futuros. Nessa perspectiva, faz todo o sentido que seja analisada essa evolução quando se pensa em contribuir para um futuro melhor. Faz-se então, um apanhado dos principais desenvolvimentos históricos relacionados com a energia eléctrica e sua produção com recurso às turbinas eólicas.

2.1. CONTEXTUALIZAÇÃO

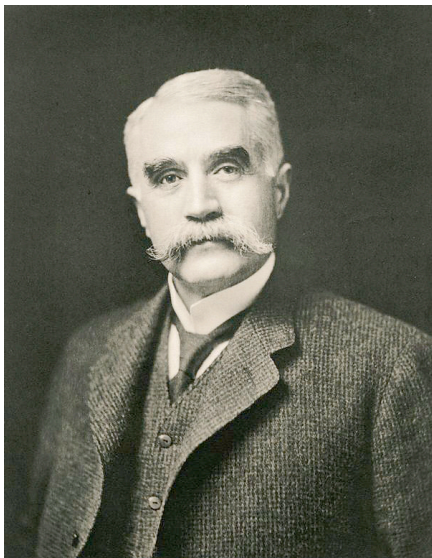
A larga escala de utilização da energia eléctrica começou com a construção das primeiras centrais eléctricas. As primeiras centrais eléctricas, a carvão e hidroeléctricas, foram construídas em Nova York, em 1882, e em Berlim, em 1884, com uma potência de saída de apenas 500 kW [1]. No entanto, foi em 30 de Setembro de 1882 que, no rio Fox em Appleton Wisconsin, entrou em funcionamento a primeira central hidroeléctrica do mundo, à qual se deu o nome de “Appleton Edison Light Company”, Figura 2. Esta foi construída pelo fabricante de papel “Appleton HF Rogers” que se inspirou nos planos de Thomas Edison para a construção de uma central hidroeléctrica em Nova York. A central tinha capacidade para iluminar a casa dos “Rogers”, um edifício vizinho e iluminar-se a si própria [2].



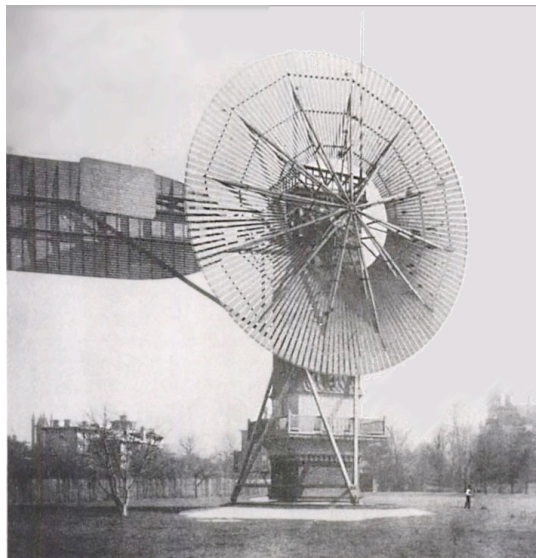
Figura 2 Primeira central hidroelétrica, no rio Fox em Appleton, Wisconsin, 1882 [2].

Com uma demanda em constante crescimento, esta tecnologia evoluiu a passos largos, introduzindo logo a corrente trifásica e aumentando constantemente a potência. Esta abrangeu quase todas as grandes cidades dos países industrializados no início do século XX. Nas cidades mais pequenas e zonas rurais, a rede eléctrica evoluiu de uma maneira bastante mais lenta. Foram criadas e interligadas centrais eléctricas de variados tipos e construídas redes de transporte extensas. Na Europa em geral, essencialmente na Alemanha até aos anos vinte, a rede chegou quase às zonas mais remotas. Para tal, grandes esforços económicos e tecnológicos foram realizados. Nos Estados Unidos da América só em 1932 é que as grandes regiões do Oeste foram abastecidas com electricidade por meio de um programa chamado “*Rural Electrification Program*”.

Nesse período, nas grandes cidades estendia-se a rede eléctrica e previa-se que nas zonas mais rurais esta tarde-se a chegar. Perante esta perspectiva de isolamento das zonas rurais face às zonas urbanas, surgiram nas zonas rurais as primeiras tentativas de gerar energia eléctrica utilizando energia eólica como fonte primária. Talvez por semelhança mecânica às turbinas eólicas da América para bombeamento de água, Charles Francis Brush, nascido em Euclid, Ohio, Estados Unidos, Figura 3 - A, já com uma larga bagagem de centrais eléctricas e dínamos, colocou em funcionamento a primeira turbina eólica para produção de energia eléctrica, Figura 3 - B.



A



B

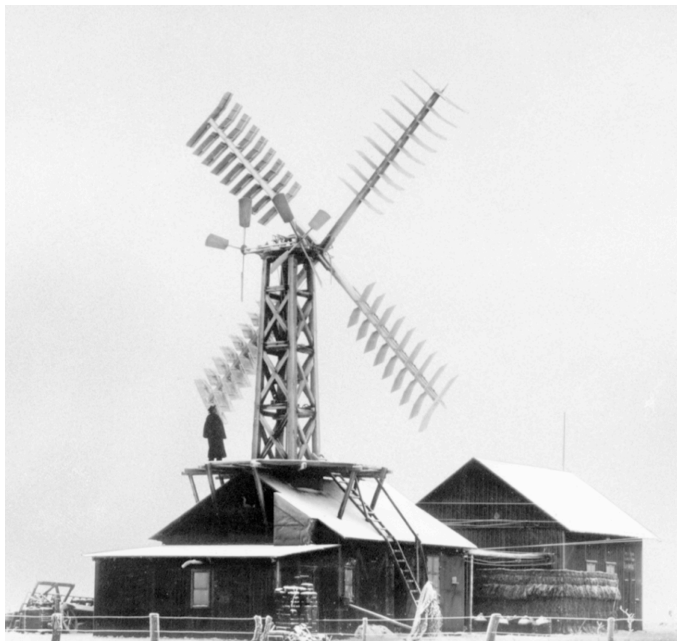
Figura 3 Charles Francis Brush, nascido em Euclid, Ohio, Estados Unidos, 1849-1929 (Figura A) [3]. A primeira turbina eólica para produção de energia eléctrica, construída por Charles F. Brush, em 1888 (Figura B) [3].

Esta turbina com um diâmetro do rotor de cerca de 17 metros, 144 pás e um dínamo de 12 kW, alimentou continuamente as 12 baterias da mansão de Brush, conseguindo que a mesma, nunca se tenha encontrado sem energia eléctrica durante mais de 20 anos [4]. A mansão de Brush, onde se encontravam implementadas muitas das suas invenções, foi a primeira casa a ter electricidade em Cleveland.

Paralelamente à invenção de Brush, do outro lado do Oceano Atlântico onde eram mais comuns os moinhos de vento, alguém tentou utilizar a energia eólica para geração de energia eléctrica. Poul La Cour, nascido na Dinamarca, Figura 4 - A, aperfeiçoou a tecnologia do moinho de vento tradicional com base em princípios científicos da sua autoria e tornou-se um dos pioneiros da produção de energia eléctrica através da energia eólica. Em 1891, em Askov, construiu uma turbina eólica experimental para a produção de energia eléctrica, Figura 4 - B. Esta turbina era constituída por quatro pás. Um facto notável foi a utilização dessa energia eléctrica para realizar a electrólise da água e obter hidrogénio, podendo assim armazenar a energia sob a forma de gás. De 1885 a 1902, as lâmpadas que utilizavam este gás iluminaram o recinto da escola de Askov.



A



B

Figura 4 Poul La Cour, Dinamarca, 1846-1908 (Figura A) [5]. Turbina eólica para produção de energia eléctrica, em Askov, Dinamarca, 1891 (Figura B) [5].

La Cour, nos anos seguintes, expandiu as suas actividades em Askov, acabando por conseguir criar a maior estação de teste de turbinas eólicas que ele próprio montou em 1897. Possivelmente, foi o primeiro a realizar testes de turbinas em túnel de vento. Em 1908, já tinha construído 72 turbinas na estação de Askov.

Com a Primeira Guerra Mundial, os preços dos combustíveis aumentaram drasticamente o que levou a um desenvolvimento ainda mais acelerado das turbinas eólicas para produção de energia eléctrica. Assim, em 1918, estavam já 120 turbinas eólicas em funcionamento. Na Dinamarca, após a Primeira Guerra, o gasóleo era relativamente barato e o interesse pela produção de energia eléctrica através de energia eólica diminuiu.

No entanto, com a Segunda Guerra Mundial, a situação alterou-se novamente. A subida inevitável dos preços dos combustíveis aumentou imediatamente o interesse pela energia eólica. Esta tecnologia, que já tinha sido desenvolvida e utilizada durante a Primeira Guerra, foi reactivada e foram construídos novos pontos de produção [5].

As turbinas eólicas, como suplemento às centrais eléctricas, evoluíram muito nas últimas décadas. As sucessivas crises do preço do petróleo e problemas ambientais foram motivos fortes que aceleraram esta evolução.

Foi na República Federal da Alemanha que se deu um salto muito importante para o desenvolvimento da tecnologia hoje existente. Foi fundada em 1949 a “Windkrafte.V Studiengesellschaft”, Sociedade para o Estudo da Energia Eólica. Ulrich Hütter, Figura 5 - A, em nome da “Werkzeugbau Allgaier GmbH”, em Uchingen, Alemanha, projectou inicialmente uma turbina de pequeno porte (8 a 10 kW) da qual foram construídas 90 unidades e com a qual obteve resultados satisfatórios. Mais tarde, 1958, Hütter começou a desenvolver uma turbina de maior capacidade. Foi idealizada a W-34 (100 kW), Figura 5 – B, com um rotor de 34 metros de diâmetro com pás de fibra de vidro. Nesse mesmo ano, esta turbina foi construída e esse modelo veio influenciar o desenho das turbinas até aos dias de hoje em inúmeras particularidades. Os anos seguintes a 1975 marcaram a primeira fase da moderna tecnologia eólica. Os projectistas das grandes turbinas eólicas seguiram as ideias de Hütter tendo sido fortemente influenciados pelo exemplo técnico da W-34.



A



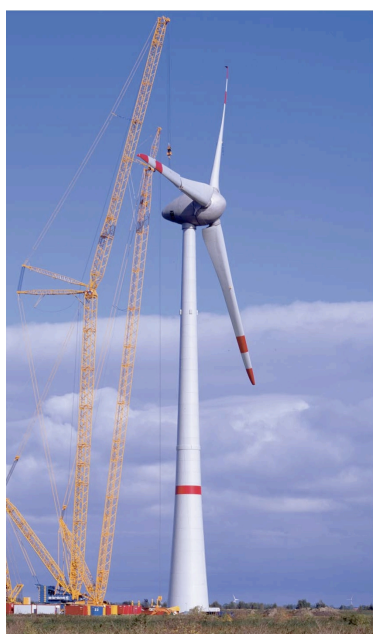
B

Figura 5 Ulrich Hütter, Alemanha 1910 – 1989 (Figura A) [5]. Eólica W-34, rotor de 34 m de diâmetro e uma potência de 100 kW (Figura B) [5].

Foram os dados da turbina W-34 e de um outro modelo que constituíram um ponto de partida para o trabalho da “National Aeronautics and Space Administration” (NASA) na investigação no domínio da tecnologia da energia eólica a partir de 1975 [5].

Esta constante evolução levou ao aparecimento de muitos outros fabricantes e ao desenho de turbinas cada vez maiores, mais potentes e de diferentes tipos. Para a sua construção tem-se usado materiais compostos cada vez mais sofisticados. A empresa Enercon GmbH é a maior empresa Alemã de construção de turbinas eólicas. Na Feira Internacional de Hannover de 2006 apresentou a sua maior turbina que era uma das maiores do mundo. A turbina E-126 produz mais de 6 MW de potência com um rotor de 126 m de diâmetro e 135 m de altura da torre, Figura 6 – A [6].

O local onde se implantam as turbinas é um dos factores mais importantes para o seu bom rendimento. Sem vento não há fonte primária de energia e consequentemente nenhuma turbina produz energia eléctrica. De forma a identificar as zonas mais ventosas são realizados testes ambientais. É normalmente no alto das montanhas em zonas descampadas ou em alto mar que se encontram os locais mais favoráveis à implantação das turbinas. No alto mar é talvez o sítio mais ventoso e, por isso, propício para a colocação de parques eólicos. Actualmente são colocadas turbinas flutuantes ancoradas ao fundo do mar.



A



B

Figura 6 Turbina Enercon GmbH de 6 MW (Figura A) [5]. Parque eólico Horns Rev, a cerca de 20 km da costa da Dinamarca com uma capacidade de 160 MW (Figura B) [7].

Um exemplo deste tipo de parques encontra-se a cerca de 20 km da costa dinamarquesa desde 2002, o Horns Rev, com 80 turbinas de 2 MW. Este parque tem a capacidade total de 160 MW, Figura 6 - B [7].

Em Portugal, a EDP e a Principle Power, assinaram um acordo para o desenvolvimento de um projecto de eólicas *offshore* em águas profundas a instalar na costa portuguesa. O projecto denomina-se WindFloat e consiste numa base flutuante para a instalação de turbinas eólicas, Figura 7 [8].

Tudo isto resume um pouco tudo o que se tem feito para a geração de energia eléctrica em grande escala utilizando a energia eólica. Grande escala, por se tratar de turbinas de grande potência destinadas à produção de energia para a rede pública ou para grandes empresas. Também a micro produção de energia eléctrica está cada vez mais implantada e incentivada pelos governos. A geração de energia eléctrica através de energias renováveis como o Sol e o Vento pressupõe um nível reduzido ou neutro de emissões de dióxido de carbono.



Figura 7 Turbina flutuante, EDP e Principle Power. Projecto WindFloat [9].

Estes factores importantes do ponto de vista ambiental e económico tornam este tipo de energia muito útil e interessante para os utilizadores. Estes sistemas de micro produção são usados por empresas e por consumidores particulares para variados fins. Alguns dos exemplos onde a micro produção de energia eléctrica tem vindo a vingar e onde a micro produção de energia eléctrica através da energia eólica também se insere são: a alimentação directa de equipamentos; a diminuição do consumo da rede eléctrica; sistemas de actuação em caso de falha da rede e sistemas de venda de energia à rede.

Paralelamente ao desenvolvimento das turbinas de grande porte também as micro turbinas, Figura 8, com potências até 10 kW têm vindo a evoluir. Essa evolução passa pelo aumento da eficiência.

Hoje em dia, já existem muitos fabricantes com inúmeras soluções para cada tipo de aplicação. No entanto, muito se poderá ainda fazer e evoluir nesta área. Para isso, é necessária investigação e evolução de meios técnicos que facilitem o estudo e teste das tecnologias envolvidas.



Figura 8 Micro turbina eólica Air Breeze de 200 W [10].

2.2. CENÁRIO DA ENERGIA EÓLICA NA EUROPA

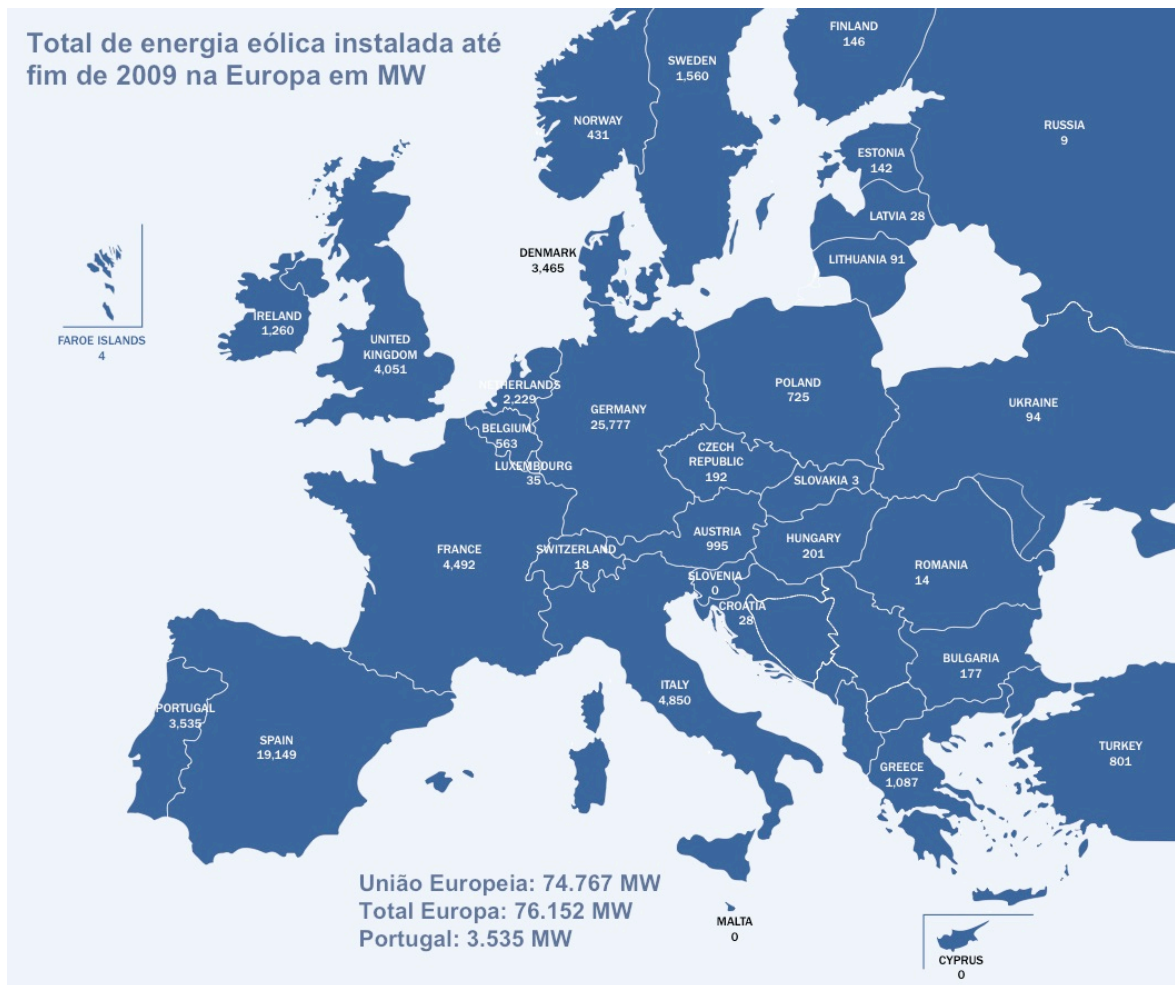


Figura 9 Total de energia eólica instalada até fim de 2009 na Europa em MW [11].

A energia eólica como produtora de energia eléctrica representa neste momento uma parte considerável relativamente a toda a energia produzida. Na Europa, essa produção ascende já aos 76 GW, Figura 9, o que equivale a cerca de 9% de toda a energia produzida na Europa, Figura 10.

Portugal contém 5% do total da energia eólica da Europa com cerca de 3,5 GW instalados. Entre os anos de 2000 e de 2009 houve um crescimento de cerca 2,2% para 9,1% da produção de energia eléctrica através da energia eólica, tal como se pode verificar na Figura 10. Este crescimento tem vindo a aumentar todos os anos. Desde 2008, é a energia eólica que se tem instalado mais, comparativamente com as outras fontes de energia, tendo uma cotação de 39%, como mostra a Figura 11, [11].

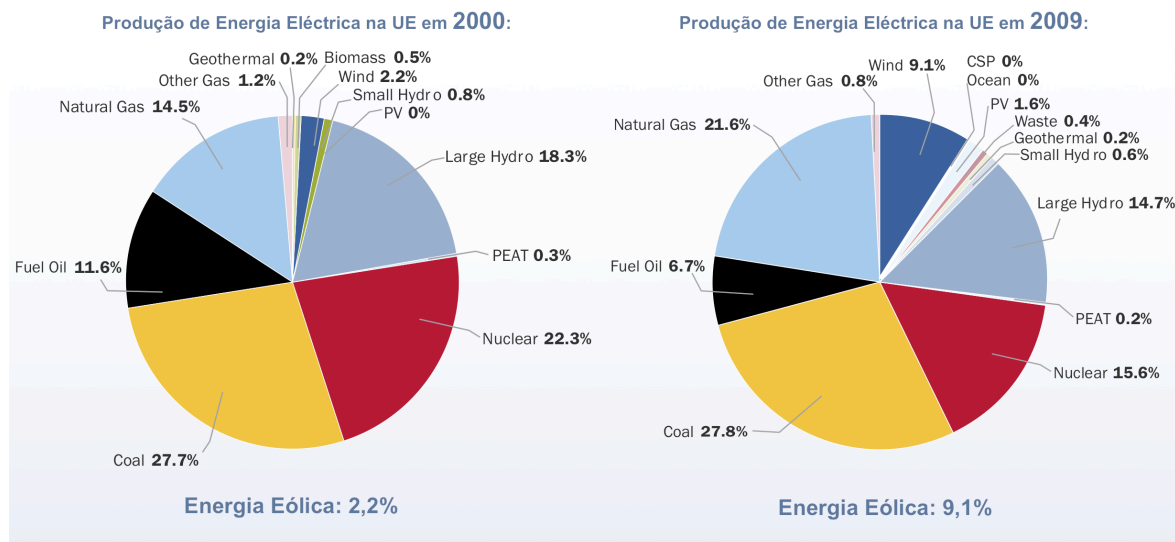


Figura 10 Comparação da energia eléctrica produzida na União Europeia nos anos 2000 e 2009.

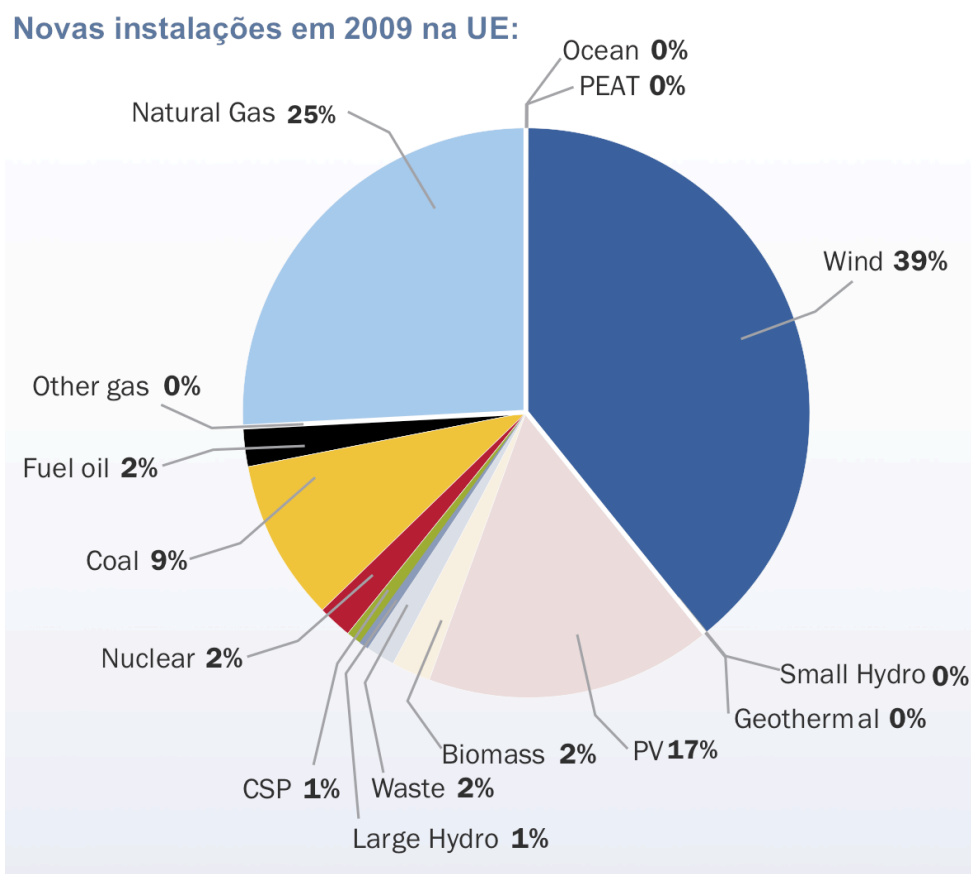


Figura 11 Novas instalações em 2009 na União Europeia [11].

Com o enquadramento histórico das turbinas eólicas e com a visão do estado geral da energia focando a energia eólica, dá-se o ponto de partida para o estudo teórico das turbinas que se apresenta na secção seguinte.

3. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Para o desenvolvimento do presente trabalho mostrou-se indispensável o estudo e aplicação de alguns conceitos teóricos. Inicialmente, foi necessário estudar os modelos matemáticos que através das características da turbina e condições de funcionamento possibilitam obter um valor muito aproximado da potência mecânica produzida. Desta forma será possível simular ou calcular o binário mecânico de uma determinada turbina exposta a determinadas condições de vento e de velocidade de rotação.

Depois de calculado o valor de binário utilizou-se um motor de Corrente Contínua (CC) para o aplicar ao gerador. Para tal, foi necessário realizar alguns ensaios ao motor CC com vista a determinar as características necessárias ao cálculo da corrente no induzido que produz o binário desejado.

O atrito, assim como massa e a inércia da turbina influenciam a sua aceleração e desaceleração quando ocorrem variações do vento ou da carga. Esses factores também foram tidos em conta no cálculo do binário a gerar pelo motor CC. Desta forma, pretende-se que o motor CC reproduza o melhor possível o binário real da turbina em diversas condições.

3.1. TURBINA EÓLICA

A definição de turbina eólica está subjacente a própria definição da energia eólica. A energia eólica é simplesmente a energia cinética contida na massa de ar. Assim, uma turbina eólica, não é mais que um instrumento que utiliza essa mesma energia para gerar binário no seu eixo de rotação, ou seja, a turbina eólica é um colector de energia eólica. [12]

3.1.1. TIPOS DE TURBINAS EÓLICAS

De facto, para se utilizar a energia do vento além dos conhecimentos científicos é possível introduzir muita criatividade. Por isso, existe uma grande diversidade de turbinas eólicas com diferentes configurações para as mais diversas condições de funcionamento. Esta diversidade é de tal forma elevada que se torna complicado definir e classificar os múltiplos tipos de turbinas existentes. No entanto, estas classificam-se em dois grandes grupos quanto ao seu eixo de rotação. Assim surge o grupo das Turbinas Eólicas de Eixo Vertical (TEEV) e o grupo das Turbinas Eólicas de Eixo Horizontal (TEEH). As TEEV são turbinas cuja rotação do rotor se realiza em torno um eixo vertical. Têm a vantagem de ter uma estrutura simples que permite a colocação de todos os componentes eléctricos e caixa redutora, caso esta exista, ao nível do solo. Não necessitam de estar em nenhuma posição concreta em relação ao sentido ou direcção do vento. Na Figura 12, encontram-se alguns exemplos deste tipo de turbinas.

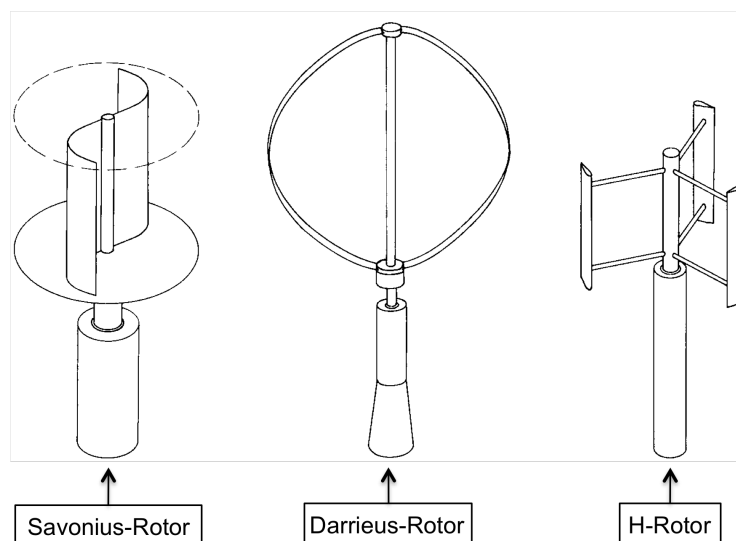


Figura 12 Alguns exemplos de tipos de turbinas de eixo vertical [13].

As TEEH são turbinas cuja rotação do rotor se realiza em torno do eixo horizontal. Assim, ao contrário das TEEV, o rotor destas turbinas encontra-se obrigatoriamente a uma distância do solo superior ao raio de varrimento do rotor e necessitam de ser orientadas em relação ao sentido do vento. Apesar destas desvantagens em relação às TEEV, as TEEH têm alguns aspectos importantes que as tornam mais interessantes.

A possibilidade da utilização de pás com desenho aerodinâmico idêntico ou igual às estudadas na aeronáutica, onde o avanço tecnológico no desenvolvimento das hélices é elevado, é uma mais-valia. Com essa tecnologia é possível otimizar aerodinamicamente cada turbina e atingir assim maior eficiência. Com estas turbinas é possível o controlo do ângulo de ataque das pás. Este facto proporciona uma protecção eficaz contra o vento de velocidade elevada e consequentemente uma protecção contra o excesso de velocidade da turbina. Especialmente para turbinas de grande porte este aspecto é da maior importância. Contrariamente a estas, as micro turbinas são normalmente com ângulo de ataque fixo e atingem elevadas velocidades de rotação. Estas são algumas das vantagens que fazem com que as turbinas eólicas para gerar electricidade sejam quase todas de eixo horizontal. A Figura 13 apresenta dois exemplos de TEEH, sendo uma delas de grande produção, Figura A, e uma outra de micro produção, Figura B.



A



B

Figura 13 Turbina de grande produção Vestas de 3 MW (Figura A) [14]. Micro turbina Air Breeze de 200 W (Figura B) [15].

Neste documento é descrito o desenvolvimento de um banco de ensaios para micro turbinas eólicas de eixo horizontal ou vertical, sendo necessário apenas fornecer ao banco de ensaios os parâmetros correspondentes a cada tipo de turbina.

3.1.2. PRINCÍPIOS FÍSICOS DA CONVERSÃO DA ENERGIA EÓLICA

Numa turbina eólica, o principal componente é o conversor de energia. Isto é, as pás que transformam parte da energia cinética contida na massa de ar em movimento de rotação ao qual está associado energia mecânica transmitida ao rotor.

Albert Betz, alemão, Figura 14, entre 1922 e 1925, aplicando leis elementares da física, foi capaz de mostrar que a energia mecânica extraível de um fluxo de ar que passa através de uma determinada área transversal é restrita a uma determinada proporção fixa de energia contida no fluxo de ar. Além disso, descobriu que a extracção ideal de energia só poderia ser realizada em uma certa proporção entre a velocidade do fluxo de ar à frente do conversor e atrás do conversor.

Embora a teoria de Betz, *Elementary Momentum Theory*, assuma o conversor de energia simplificado, sem atrito e sem perdas de fluxo de ar, os resultados são bastante úteis para a realização de cálculos aproximados em casos práticos de engenharia. Esta teoria fornece uma base física comum para a compreensão do funcionamento de conversores de energia eólica de vários tipos [13]. De seguida, descreve-se a teoria de Betz, *Elementary Momentum Theory*.



Figura 14 Albert Betz, Alemanha 1885 – 1968 [5].

A energia cinética E , de uma massa de ar m em movimento, com uma velocidade v , pode ser expressa da seguinte maneira, Equação 1:

$$E = \frac{1}{2}mv^2 \quad (Nm) \quad \text{Equação 1}$$

Numa área transversal A , através da qual passa uma massa de ar à velocidade v durante uma unidade de tempo, chama-se volume do fluxo \dot{V} e expressa-se com a Equação 2:

$$\dot{V} = vA \quad (m^3 / s) \quad \text{Equação 2}$$

O fluxo de massa de ar \dot{m} , com a densidade ρ , na Equação 3:

$$m = \rho v A dt \Leftrightarrow \dot{m} = \frac{dm}{dt} = \rho v A \quad (kg / s) \quad \text{Equação 3}$$

Diferenciando a Equação 1 e substituindo a Equação 3, define-se a potência, P , desse fluxo com a Equação 4:

$$\frac{dE}{dt} = \frac{1}{2}v^2 \frac{dm}{dt} \Leftrightarrow P = \frac{1}{2}\rho v^3 A \quad (W) \quad \text{Equação 4}$$

A questão agora é quanta energia mecânica pode ser extraída do fluxo da massa de ar que atravessa um conversor de energia com uma determinada área.

A energia mecânica só pode ser extraída usando a energia cinética do fluxo de ar. No entanto, devido à necessidade de manter o escoamento, o fluxo deve ser mantido. Isto significa que a velocidade depois do conversor deve diminuir sem alteração do fluxo de ar. Este facto leva ao aumento da área da secção transversal depois do conversor. Representando por V_1 a velocidade do ar antes de chegar ao conversor e por V_2 a velocidade de fluxo depois do conversor, na Figura 15, encontra-se a potência no conversor.

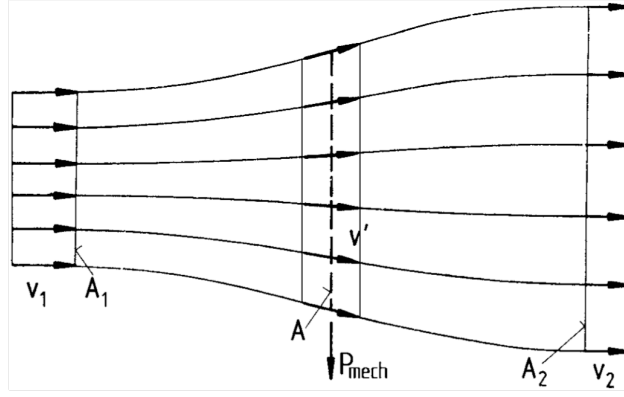


Figura 15 Condições de escoamento devido à extração de energia mecânica de um fluxo de corrente de ar livre, de acordo com a teoria de Betz [13].

A energia mecânica por unidade de tempo que um conversor em forma de disco consegue extrair do fluxo de ar corresponde à diferença de potência do fluxo do ar antes e depois do conversor, Equação 5:

$$P = \frac{1}{2} \rho A_1 v_1^3 - \frac{1}{2} \rho A_2 v_2^3 = \frac{1}{2} \rho (A_1 v_1^3 - A_2 v_2^3) \quad (W) \quad \text{Equação 5}$$

Como já referido o fluxo da massa de ar é mantido constante o que leva à Equação 6:

$$\rho v_1 A_1 = \rho v_2 A_2 \quad (kg/s) \quad \text{Equação 6}$$

Substituindo a Equação 6 na Equação 5, tem-se a Equação 7:

$$P = \frac{1}{2} \rho v_1 A_1 (v_1^2 - v_2^2) \quad (W) \quad \text{Equação 7}$$

Tendo em conta a Equação 3 e a Equação 7, vem a Equação 8:

$$P = \frac{1}{2} \dot{m} (v_1^2 - v_2^2) \quad (W) \quad \text{Equação 8}$$

A partir desta equação, pode parecer que a potência P atinge o seu máximo quando v_2 é zero. No entanto, este resultado não tem sentido físico. Se a velocidade do ar à saída do conversor for zero então a velocidade do ar antes do conversor seria igualmente nula devido à inexistência de escoamento do fluxo de ar. Torna-se então necessário encontrar a proporção v_2/v_1 para a qual a potência extraível atinge o seu máximo. Isso exige uma outra

equação da energia mecânica do conversor. Usando a lei da conservação do momento, a força que o ar exerce sobre o conversor pode ser expressa pela Equação 9:

$$F = \dot{m}(v_1 - v_2) \quad (N) \quad \text{Equação 9}$$

De acordo com a Terceira Lei de Newton, também conhecida como Lei do Par Acção Reacção, a força exercida pelo fluxo sobre o conversor é contrabalançada por uma força de igual magnitude mas de sentido oposto exercida pelo conversor sobre o fluxo de ar. Assim sendo, a potência no conversor necessária para contrabalançar a potência do fluxo de ar, responsável pela força exercida em sentido contrário referente à potência extraída para uma velocidade do fluxo de ar v' , é dada pela Equação 10:

$$P = Fv' = \dot{m}(v_1 - v_2)v' \quad (W) \quad \text{Equação 10}$$

A potência mecânica extraída do fluxo de ar pode ser obtida a partir da diferença de energia, ou de potência, antes e depois do conversor, Equação 8. Por outro lado, também é possível obter essa mesma potência a partir da potência do par acção reacção do conversor e fluxo de ar, Equação 10. Igualando estas duas expressões tal como apresentado na Equação 11, é obtida a relação da velocidade do fluxo de ar v' como a média aritmética entre v_1 e v_2 tal como se apresenta na Equação 12:

$$\frac{1}{2} \dot{m}(v_1^2 - v_2^2) = \dot{m}(v_1 - v_2)v' \quad (W) \quad \text{Equação 11}$$

$$v' = \frac{1}{2}(v_1 + v_2) \quad (m/s) \quad \text{Equação 12}$$

Assim sendo, para o fluxo de massa de ar, \dot{m} , tem-se a Equação 13:

$$\dot{m} = \rho A v' = \frac{1}{2} \rho A (v_1 + v_2) \quad (kg/s) \quad \text{Equação 13}$$

De acordo com esta última equação e com a Equação 8, a potência mecânica, P , extraída pelo conversor pode ser expressa pela Equação 14:

$$P = \frac{1}{4} \rho A (v_1^2 - v_2^2) (v_1 + v_2) \quad (W) \quad \text{Equação 14}$$

Como referência para esta potência, é realizada a comparação com a potência P_0 do fluxo de ar livre passando pela mesma área A mas na ausência do conversor, Equação 15:

$$P_0 = \frac{1}{2} \rho v_1^3 A \quad (W) \quad \text{Equação 15}$$

A relação entre a potência mecânica P extraída pelo conversor e a potência do fluxo de ar livre P_0 , é chamado de coeficiente de potência C_p , Equação 16:

$$C_p = \left| \frac{P}{P_0} \right| = \left| \frac{\frac{1}{4} \rho A (v_1^2 - v_2^2) (v_1 + v_2)}{\frac{1}{2} \rho A v_1^3} \right| \quad (-) \quad \text{Equação 16}$$

Simplificando a Equação 16, o coeficiente de potência C_p , pode ser definido directamente em função da razão de velocidade v_2/v_1 , Equação 17:

$$C_p = \left| \frac{P}{P_0} \right| = \frac{1}{2} \left| 1 - \left(\frac{v_2}{v_1} \right)^2 \right| \left| 1 + \frac{v_2}{v_1} \right| \quad (-) \quad \text{Equação 17}$$

O coeficiente de potência C_p , ou seja, a relação entre a potência mecânica extraível e a potência contida no fluxo de ar livre, depende agora apenas da relação entre as velocidades do ar antes e depois do conversor. Esta relação pode ser representada graficamente, Figura 16, através da Equação 17. Como é possível verificar na Figura 16, C_p atinge o seu máximo numa determinada proporção de v_2/v_1 .

Olhando para a Equação 17, como v_2/v_1 sendo a variável, esta função tem o seu máximo de 16/27 para $v_2/v_1 = 1/3$.

Albert Betz foi o primeiro a obter este importante valor, 16/27, que passou a ser conhecido por “Limite de Betz”.

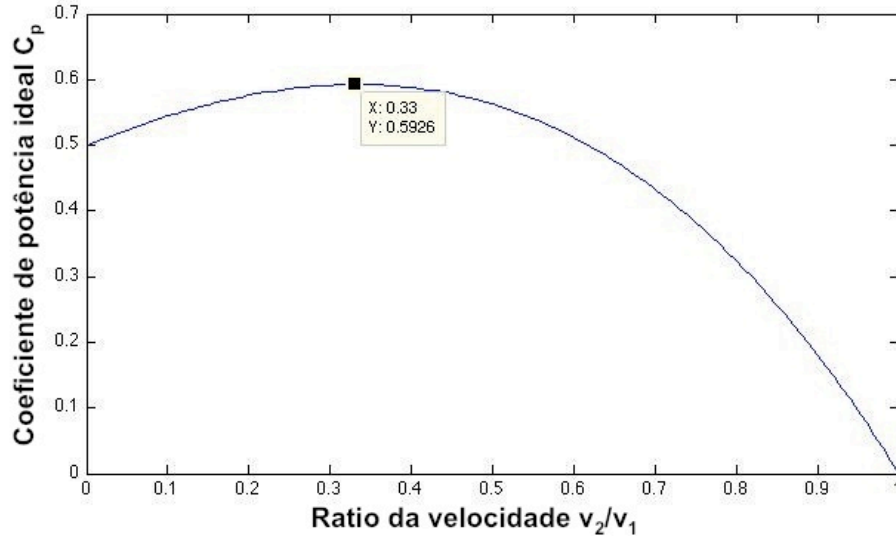


Figura 16 Representação gráfica do coeficiente de potência ideal, C_p , em função do ratio da velocidade do fluxo de ar à frente, e atrás, do conversor, respectivamente, v_1 e v_2 .

Sabendo que o C_p máximo ocorre com $v_2/v_1 = 1/3$, a velocidade do fluxo de ar v' é dado pela Equação 18:

$$v' = \frac{2}{3}v_1 \quad (m/s) \quad \text{Equação 18}$$

E a velocidade depois do conversor, v_2 pode ser calculada com a Equação 19 [13]:

$$v_2 = \frac{1}{3}v_1 \quad (m/s) \quad \text{Equação 19}$$

Da Equação 16, podemos obter a expressão da potência extraída em função de C_p , tal como apresentado na Equação 20:

$$P = \frac{1}{2}C_p \rho A v_1^3 \quad (W) \quad \text{Equação 20}$$

A energia cinética é proporcional ao quadrado da velocidade da massa de ar, Equação 1, e a potência do fluxo de ar livre que passa numa determinada área A , Equação 4, assim como a potência extraída pelo conversor, Equação 20, é proporcional ao cubo da velocidade dessa mesma massa de ar. Isto leva, a que uma pequena variação da velocidade do vento, possa provocar uma considerável variação na potência extraída pelo conversor [12].

Todas estas relações básicas pressupõem condições ideais. Logo, o coeficiente de potência, C_p , será sempre inferior ao Limite de Betz, ou seja, a potência extraída terá sempre um valor inferior ao valor ideal, Equação 21:

$$P < C_{p_{ideal}} P_0 \quad (W), \quad C_{p_{ideal}} = \frac{16}{27} \quad (-) \quad \text{Equação 21}$$

Além destas relações não considerarem condições reais, também não consideram o design do conversor de energia. No entanto, este influencia bastante o coeficiente de potência, ou seja, a quantidade de potência que se poderá extrair.

A extracção de energia realizada pelo conversor é resultante de um conjunto de forças que o fluxo da massa de ar provoca no conversor e vice-versa. Este resultado é função do desenho da turbina de acordo com a superfície de arrasto aerodinâmico e de sustentação aerodinâmica. O design mais simples para um conversor de energia eólica é usando superfícies de arrasto puro, Figura 17.

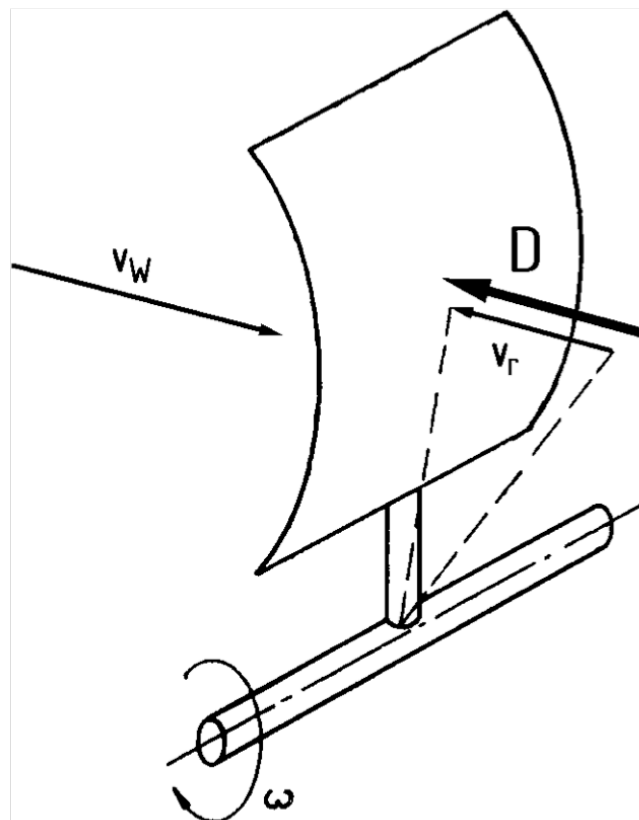


Figura 17 Esquema de um conversor de energia eólica de arrasto puro e descrição das forças envolvidas [13].

Neste tipo de conversor, temos a força provocada pelo fluxo da massa de ar livre, V_W , ou seja vento, a uma determinada velocidade numa superfície côncava. Na mesma direcção mas em sentido oposto temos a força resultante do atrito da superfície convexa designada por força de arrasto, D . Esta força de arrasto provoca uma diminuição da velocidade da superfície, $V_{Superfície}$, em relação à velocidade do vento, quantificada pelo vector V_r , Equação 22.

$$V_{Superfície} = V_W - V_r \quad (-)$$

Equação 22

Como a força de arrasto neste tipo de design tem um peso relativamente grande, faz com que o coeficiente de potência para este tipo conversores eólicos não vá além dos $C_{p\ Max} \approx 0.2$. Outro tipo de design, bastante mais eficiente, baseia-se na sustentação aerodinâmica, o mesmo princípio das asas dos aviões, Figura 18.

A grande maioria das turbinas eólicas modernas de eixo horizontal utilizam um conversor de energia de 2 ou 3 pás e o princípio da sustentação aerodinâmica, Figura 19. Esta sustentação aerodinâmica é criada nas pás do rotor de uma maneira muito idêntica às asas de um avião. A inclinação da corda em relação à direcção da velocidade do fluxo de ar livre, V_r , determina o ângulo de ataque.

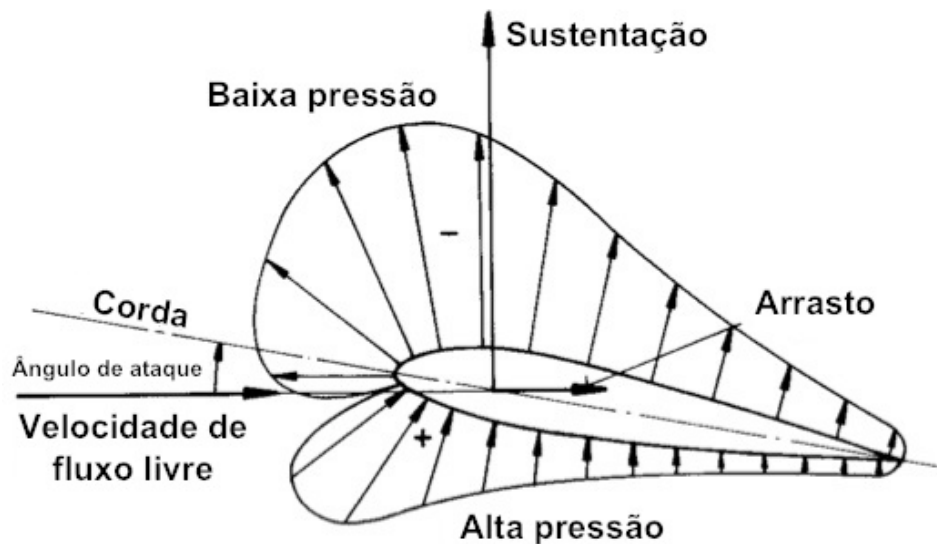


Figura 18 Esquema das forças aerodinâmicas que actuam numa asa de um avião [13].

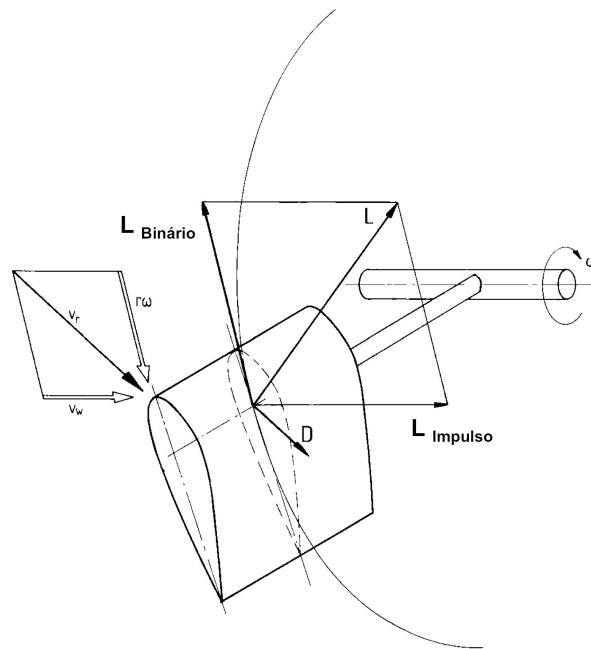


Figura 19 Esquema de um conversor de energia eólica por sustentação e descrição das forças envolvidas [13].

O fluxo de ar livre vai provocar na pá do rotor, na mesma direcção, uma determinada força de arrasto D e uma força de sustentação L na perpendicular. Esta força de sustentação, L , pode ser dividida numa componente de binário, $L_{Binário}$, no plano de rotação do rotor, e uma componente de impulso, $L_{Impulso}$, perpendicular ao plano de rotação. A componente de binário, $L_{Binário}$, constitui a força de binário que fará rodar o rotor. A relação da força de sustentação L e a força de arrasto D pode atingir uma relação de até 200. Daí a sua alta eficiência como conversor eólico de energia.

A diversidade de conversores existente faz com que exista também muita diversidade no que diz respeito ao design e funcionamento. Alguns funcionam apenas por arrasto e outros usam parcialmente a força de sustentação. Os mais difundidos e modernos usam a força de sustentação aerodinâmica como a sua principal força de binário. Como seria de esperar, também os coeficientes de potência de cada um deles diferem. Na Figura 20, estão representados os coeficientes de potência, C_p , para diferentes tipos de conversores eólicos. Estes servem apenas de referência, pois depende muito dos pormenores do design adoptado.

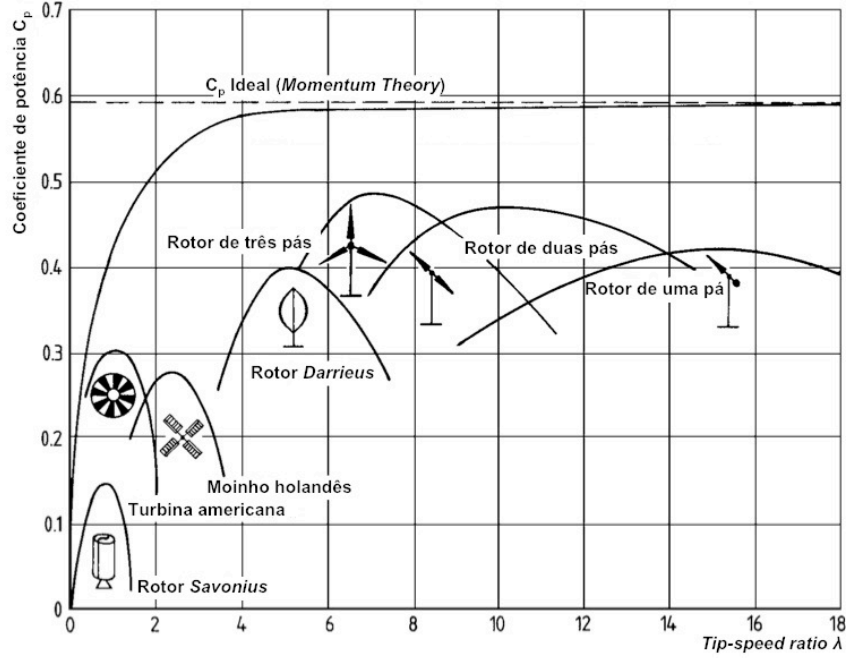


Figura 20 Coeficientes de potência, C_p , de referência, para diferentes tipos de conversores eólicos em função do *TIP Speed Ratio* λ [13].

Como é possível verificar na Figura 20, os conversores com rotor de três pás são os conversores com o C_p mais elevado e consequentemente melhor eficiência. Talvez por isso, a grande maioria dos conversores sejam desse tipo.

Também na Figura 20, podemos verificar que o C_p não é constante, tal como já tínhamos verificado na Figura 16, onde se encontrava em função da relação v_2/v_1 . Agora é apresentado em função do *TIP Speed Ratio*, λ . O *TIP Speed Ratio*, λ , é a razão entre a velocidade tangencial, ωr , das pás do rotor e a velocidade do vento, V_1 , Equação 23 [12]:

$$\lambda = \frac{\omega r}{V_1} \quad (-) \quad \text{Equação 23}$$

Para o cálculo do binário, T_M , podemos dividir a potência, P , Equação 20, pela velocidade angular ω , Equação 24:

$$T_M = \frac{1}{\omega} P = \frac{1}{\omega} \frac{1}{2} C_p \rho A v_1^3 \quad (N/m)$$

Depois de algumas simplificações, é possível definir o binário pela Equação 25:

$$T_M = \frac{1}{2} C_p \frac{1}{\lambda} \rho r A v_1^2 \quad (N / m) \quad \text{Equação 25}$$

Dividindo o coeficiente de potência, C_p , pelo *TIP Speed Ratio*, λ , podemos obter o coeficiente de binário, C_M , Equação 26:

$$C_M = \frac{C_p}{\lambda} \quad (-) \quad \text{Equação 26}$$

Substituindo na Equação 25 a Equação 26, pode-se apresentar o binário, T_M , em função do coeficiente de binário, C_M , com a Equação 27:

$$T_M = \frac{1}{2} C_M \rho r A v_1^2 \quad (N / m) \quad \text{Equação 27}$$

Tal como na Figura 20 para os coeficientes de potência na Figura 21 encontram-se representados os coeficientes de binário de referência para diferentes tipos de conversores eólicos.

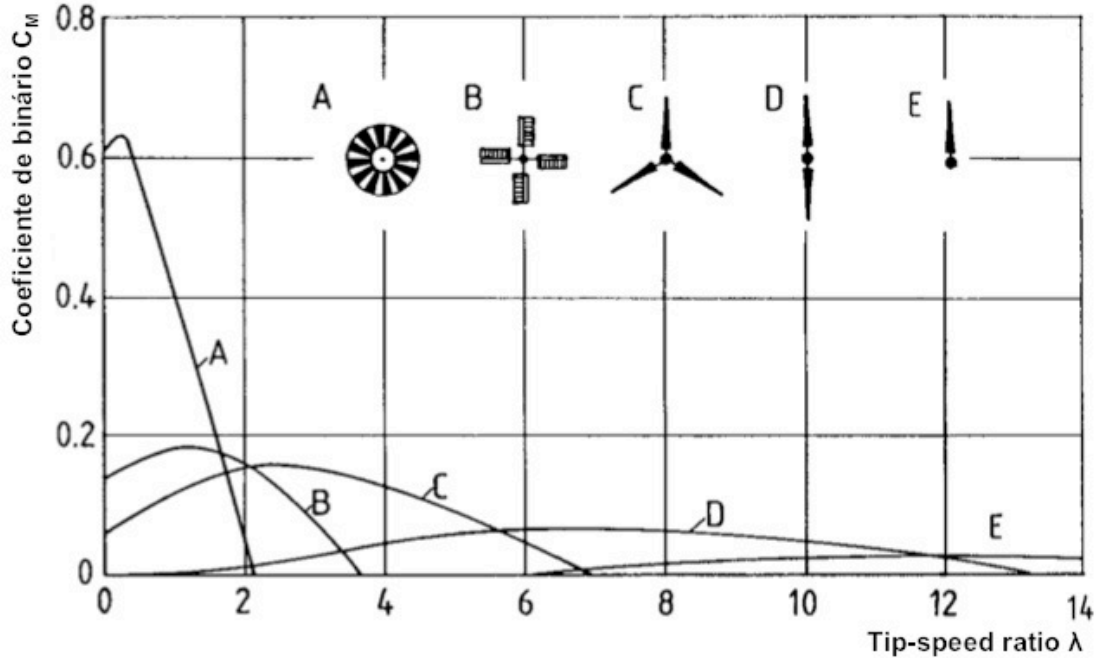


Figura 21 Coeficientes de binário, C_M , de referência, para diferentes tipos de conversores eólicos em função do *TIP Speed Ratio* λ [13].

O modelo de uma turbina não é mais que a curva do coeficiente de potência, C_P , ou de binário, C_M , em função da relação da velocidade tangencial das pás do rotor, ωr , e da velocidade do vento, V_I , ou seja, do *TIP Speed Ratio*. Esta curva é independente do raio da turbina.

Para a representação deste tipo de curvas existem variados modelos. No entanto, para o desenvolvimento e validação deste projecto utilizou-se apenas um. O modelo implementado na aplicação é o da Equação 28 [18]:

$$C_M = c0 + c1 * \lambda^{(alf-1)} - c2 * \lambda^{(bet-1)} \quad (-) \quad \text{Equação 28}$$

As constantes $c0$, $c1$, $c2$, alf e bet são os parâmetros da curva.

3.2. VENTO

O vento é o fluxo da massa de ar provocado pelas diferenças de pressão atmosférica devidas ao aquecimento não uniforme da superfície terrestre. A energia cinética contida neste fluxo define-se por energia eólica. Este fluxo é variável em direcção, sentido e velocidade não só pelas variadas condições climáticas, mas também, pela rugosidade da superfície, obstáculos e altitude.

Com a variação da velocidade do vento, varia automaticamente a energia cinética contida nesse vento. Como já verificámos anteriormente na Equação 20, uma pequena variação da velocidade, tem uma influência na potência convertida igual ao cubo dessa variação. Assim, é natural a necessidade de estudos das condições de vento para a colocação de um conversor. Comummente, são as zonas mais altas, litoral e alto mar, que apresentam melhores condições para parques de turbinas eólicas.

3.3. MOTOR DE CORRENTE CONTÍNUA

No desenvolvimento do banco de ensaios, usou-se um motor eléctrico de corrente contínua (CC) de íman permanente para a aplicação do binário calculado ao gerador.

A eleição do motor não se mostrou demasiado importante. O cálculo do valor do binário que uma determinada turbina produz em determinadas condições e num determinado instante é o aspecto mais importante para a veracidade do simulador. Conseguindo-se isso, haveria com certeza diversos tipos de actuadores para aplicar esse binário. De entre o

equipamento disponível no laboratório, encontrava-se já um motor CC de íman permanente com uma potência suficiente para simular pequenas turbinas e assim poder testar e validar o projecto. O projecto seria igualmente válido com outro tipo de actuadores, como por exemplo motores de corrente alternada (AC), desde que se assegurasse o valor do binário no rotor.

O motor CC de íman permanente é uma máquina com um princípio de funcionamento simples. Este tipo de motor é normalmente fabricado para pequenas potências, uma vez que o campo magnético indutor é criado por ímã permanente o que limita a intensidade magnética indutora. Existe o risco dos ímãs se desmagnetizarem com correntes excessivas no rotor ou por aquecimento, restringindo assim este tipo de motores para pequenas potências. Hoje, com o desenvolvimento de novos materiais magnéticos como o samário-cobalto ou neodímio-ferro-boro, as limitações de potência e temperatura têm vindo a diminuir [16].

Este tipo de motores é normalmente constituído por um estator de íman permanente em forma de cilindro com uma espessura constante e magnetização radial, um rotor com dois ou mais pólos e as escovas que levam a corrente aos enrolamentos do rotor. A carcaça é comumente de material magnético, ajudando a conter o campo magnético do estator e, ao mesmo tempo, facilitando a fixação dos ímãs permanentes.

Na Figura 22, mostra-se o funcionamento básico do motor CC de íman permanente de dois pólos. Ao ser aplicada uma tensão nas escovas surge uma corrente que percorre os enrolamentos do rotor provocando um campo magnético com um pólo Norte e um pólo Sul. Esses pólos são criados de maneira a que o pólo Norte do rotor fique do lado do pólo Norte do estator de íman permanente e o mesmo para o pólo Sul do rotor e do estator, Figura 22 - A. Como pólos iguais se repelem, ambos irão exercer força no sentido de se afastarem do pólo igual, fazendo assim rodar o rotor, Figura 22 - B. Ao rodar, os pólos do rotor estes aproximam-se dos pólos complementares do estator, como pólos diferentes atraem-se este movimento é favorecido.

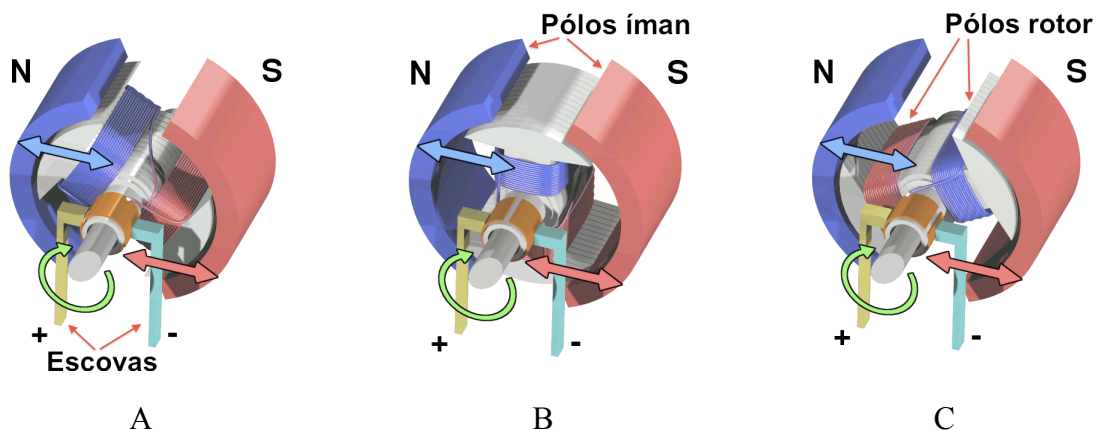


Figura 22 Funcionamento básico de um motor de corrente contínua de íman permanente de dois pólos. A repulsão de pólos iguais (Figura A), instante intermédio (Figura B) e último instante (Figura C) antes da troca de polarização, que coloca o sistema na situação inicial (Figura A) [17].

Quando essa atracção se encontra quase no ponto máximo, Figura 22 - C, a corrente passa a alimentar os enrolamentos do rotor em sentido contrário, colocando todo o sistema na situação inicial, Figura 22 – A. Para motores com mais pólos, o princípio de funcionamento é exactamente o mesmo. O sentido de rotação destes motores pode ser invertido, invertendo apenas a polarização das escovas.

Na Figura 23, encontra-se representado o circuito equivalente do motor CC de íman permanente. Este circuito é composto pela resistência dos enrolamentos do rotor, R_a , e pela força electromotriz do rotor, E_a , que se encontra em função do produto da constante de binário do motor, K_m , com a velocidade angular, ω_m .

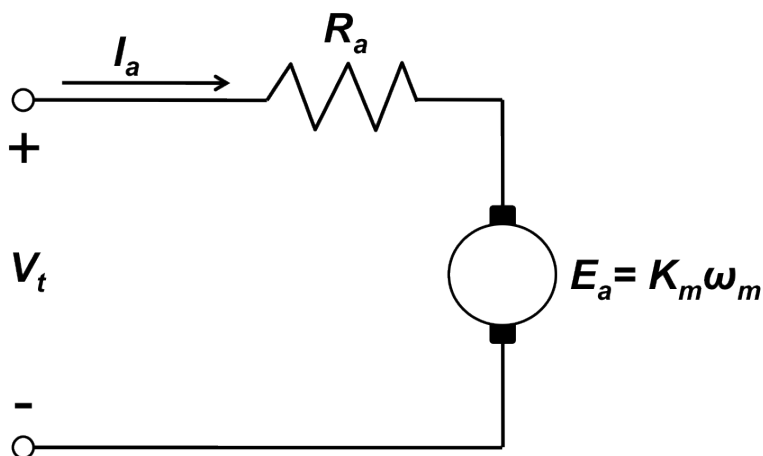


Figura 23 Circuito equivalente de um motor CC de íman permanente [16].

Como K_a , é a constante geométrica do motor e o fluxo indutor, ϕ_d , é constante, K_m é definido pela Equação 29:

$$K_m = K_a \phi_d \quad (Nm/ A) \quad \text{Equação 29}$$

E E_a pela Equação 30:

$$E_a = K_m \omega_m \quad (V) \quad \text{Equação 30}$$

O binário do motor CC de íman permanente, T_m , pode ser representado simplesmente pela Equação 31:

$$T_m = \frac{E_a I_a}{\omega_m} = K_m I_a \quad (Nm) \quad \text{Equação 31}$$

Por outras palavras, T_m é directamente proporcional à corrente I_a , que percorre os enrolamentos do rotor. Assim, sabendo-se o valor da constante de binário, K_m , é possível controlar o binário de saída do motor, T_m , controlando apenas a corrente I_a .

Quando os valores da resistência dos enrolamentos, R_a , assim como a constante de binário, K_m , não são conhecidos, é possível obtê-los realizando alguns ensaios ao motor. O valor de R_a , pode ser obtido de duas maneiras: medindo o seu valor com um ohmímetro directamente nos terminais dos enrolamentos ou realizando um ensaio ao motor com o rotor travado, com o valor de tensão e corrente conhecidos.

Equação do motor, na Equação 32:

$$V_t = R_a I_a + E_a \quad (V) \quad \text{Equação 32}$$

Num ensaio com o rotor travado, a velocidade angular do motor, ω_m , é zero. Assim sendo, E_a , é também zero, pela Equação 30. Então, com rotor travado, tem-se a Equação 33:

$$V_t = R_a I_a \quad (V) \quad \Leftrightarrow \quad R_a = \frac{V_t}{I_a} \quad (\Omega) \quad \text{Equação 33}$$

Sabendo o valor de V_t e I_a , com o rotor travado, é possível obter-se desta forma o valor de R_a .

Para se obter o valor da constante de binário do motor, K_m , realiza-se o ensaio do motor em vazio, Equação 34:

$$V_t = R_a I_a + K_m \omega_m \quad (V) \quad \text{Equação 34}$$

Conhecendo os valores de V_t , I_a , R_a e ω_m é possível obter K_m pela Equação 35:

$$K_m = \frac{V_t - R_a I_a}{\omega_m} \quad (Nm/A) \quad \text{Equação 35}$$

Sabendo K_m , é então possível a partir da equação do binário, Equação 31, controlando o valor da corrente, I_a , colocar no rotor do motor o valor de binário, T_m , desejado.

3.4. MECÂNICA

Tanto a turbina eólica como o motor eléctrico são mecanismos de rotação. Logo, têm atritos e inércias. Quando se trata de um sistema que necessita de simular e aplicar algum tipo de comportamento de um determinado mecanismo, torna-se necessário considerar os binários de atrito e de inércia envolvidos para uma simulação mais realista. Como tal, no banco de ensaios desenvolvido, foram tidos em conta os binários de atrito e de inércia da turbina e do motor CC, conforme o representado na Equação 36.

$$T_{M_res} = T_M + T_{a_e_mot} + T_{a_d_mot} + T_{J_mot} - T_{a_e_turb} - T_{a_d_turb} - T_{J_turb} \quad (Nm) \quad \text{Equação 36}$$

Somando os binários de atrito e inércia do motor CC para que sejam compensados e assim anulados, e subtraindo os binários de atrito e inércia da turbina existentes na turbina real, o binário resultante, T_{M_res} , é então igual ao binário mecânico na turbina, T_M ,

Com a exposição dos conhecimentos teóricos que suportam o banco de ensaios, passa-se ao capítulo seguinte dedicado ao seu desenvolvimento.

4. BANCO DE ENSAIOS DESENVOLVIDO

Neste capítulo descreve-se o banco de ensaios desenvolvido, Figura 24. Primeiro explica-se a interface com o utilizador e depois descreve-se em pormenor, recorrendo aos fundamentos teóricos apresentados, a aplicação e equipamento desenvolvidos. Descreve-se também uma aplicação realizada em Matlab que permite a observação e análise das variáveis internas do simulador.

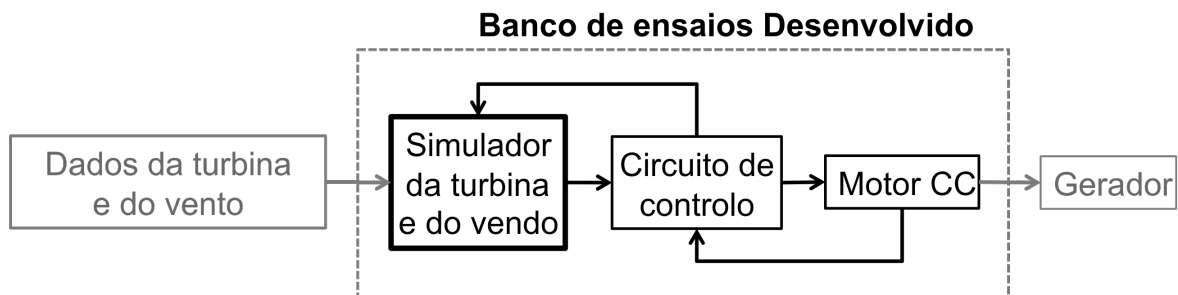


Figura 24 Diagrama de blocos do banco de ensaio desenvolvido.

4.1. ARQUITECTURA DO BANCO DE ENSAIOS

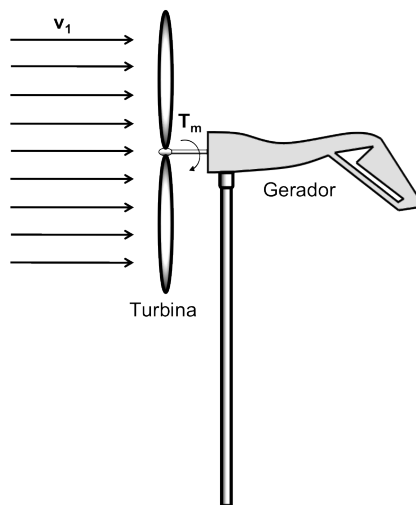


Figura 25 Representação de um gerador eólico com a estrutura comum de funcionamento.

Um gerador de energia eléctrica por rotação do rotor, apenas necessita de um binário que faça rodar o seu rotor e assim poder gerar uma diferença de potencial aos seus terminais, e consequentemente gerar energia eléctrica. Esse binário pode ser proveniente de várias origens. Tratando-se de um gerador eólico esse binário é proveniente, tal como o nome indica, da fonte de energia eólica. Para isso, é usado um conversor de energia eólica em binário e velocidade de rotação que quando aplicado ao rotor do gerador eléctrico produz energia eléctrica.

Um gerador eólico, Figura 25, encontrando-se em funcionamento nas condições para as quais foi projectado é acoplado a uma turbina eólica. Este gerador é colocado a uma certa altitude numa região com condições ventosas favoráveis ao seu funcionamento. É necessário efectuar testes ao gerador para determinadas condições de vento e para diferentes tipos de turbinas para que se possa otimizar o seu funcionamento. No entanto, isto mostra-se muito difícil, trabalhoso e dispendioso quando realizados no local em condições de funcionamento. Daí, o objectivo e aplicação deste trabalho.

O banco de ensaios desenvolvido consiste num sistema para testar geradores eólicos em laboratório, para diferentes turbinas, com condições controladas. Para isso, é calculado o binário que uma dada turbina eólica produziria em determinadas condições de vento e de funcionamento. Depois, este binário é aplicado à máquina eléctrica do gerador eólico por meio de um motor de corrente contínua.

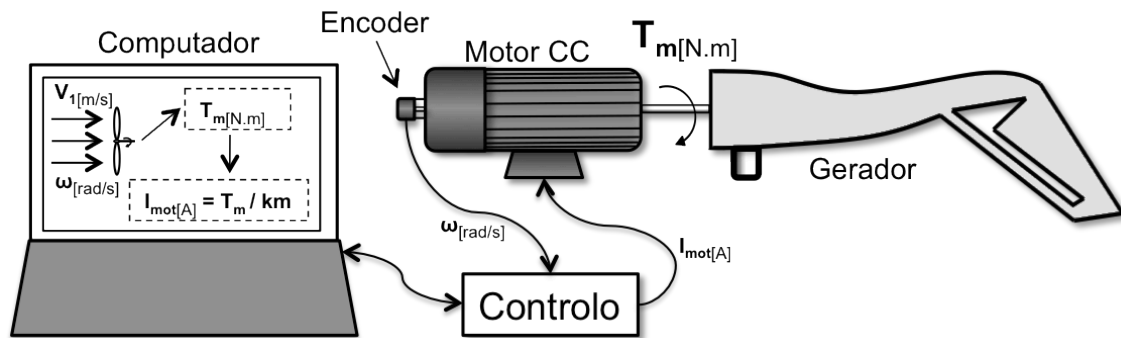


Figura 26 Representação da arquitectura do banco de ensaios de micro geradores eólicos desenvolvido, apresentando os principais componentes.

Na Figura 26, encontra-se uma representação da arquitectura do banco de ensaios. Este é constituído por um software que corre num computador, um circuito de controlo e um motor CC com um encoder acoplado.

Nas secções seguintes, serão descritos com pormenor cada um dos componentes, assim como todo o desenvolvimento.

4.2. FERRAMENTAS DE DESENVOLVIMENTO

O desenvolvimento deste projecto não teria sido possível sem o uso de determinadas ferramentas. Algumas, talvez não fossem estritamente necessárias, porém ajudaram muito no desenvolvimento. Estas ferramentas são descritas nas subsecções 4.2.1 e 4.2.2.

4.2.1. HARDWARE

- Computador Pentium 4 a 3,4GHz com 2Gb de RAM
- Placa de aquisição de dados da National Instruments, NI PCI-6010
- Motor CC AV72E, 170V, 2 pólos, da Drive Systems
- Osciloscópio Tektronics MSO 4054, 500MHz, 2.5GS/s
- Multímetros *FLUKE* 289 e *FLUKE* 179
- Fontes de alimentação *HAMEG* instruments HM-7042-5 e *TOROID* FG500/55
- Gerador AirX 400W

- Diversos componentes de electrónica: resistências; condensadores; amplificadores operacionais; transdutores de corrente e de tensão; reguladores de tensão; cabos, etc.

4.2.2. SOFTWARE

- Microsoft Windows XP Professional
- Microsoft Visual Studio 2008
- Matlab R2008b
- NI-DAQmx 7.4.0, da National Instruments

4.3. SOFTWARE DESENVOLVIDO

Desenvolveu-se uma aplicação no Microsoft Visual Studio, em C++, usando as livrarias NI-DAQmx 7.4.0, da placa de aquisição de dados PCI-6010.

É nesta aplicação que se concentra a maioria do projecto, pois é nela que se implementa a maior parte dos conhecimentos teóricos obtidos sobre turbinas eólicas, já descritos no capítulo 3 deste documento.

A aplicação realiza todos os cálculos necessários à simulação e comunica com o restante sistema exterior, circuito de potência e de aquisição de dados, através da placa PCI-6010.

Nas subsecções seguintes encontra-se documentada a aplicação desenvolvida. São descritos desde a sua interface gráfica até à sua própria construção interna.

4.3.1. INTERFACE GRÁFICA DA APLICAÇÃO

Para uma melhor interação com o utilizador, desenvolveu-se uma interface gráfica do tipo “janela de Windows”, em Microsoft Visual Studio.

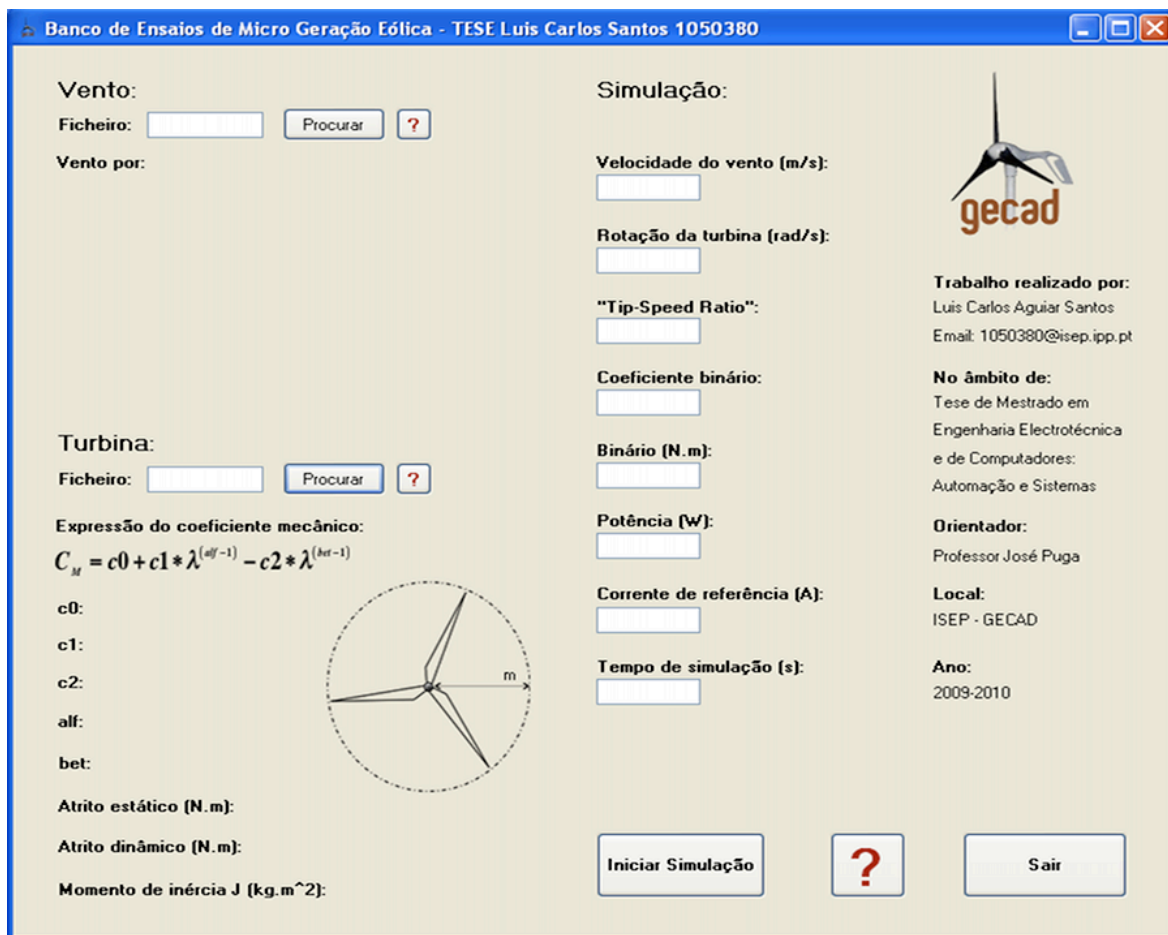


Figura 27 Imagem da interface gráfica desenvolvida em C++, correspondente ao instante inicial.

Na Figura 27 encontra-se uma imagem da interface gráfica desenvolvida, correspondendo esta imagem ao instante inicial da execução do programa. Esta encontra-se dividida em três partes: “Vento”, “Turbina” e “Simulação”. Em cada uma delas é possível observar toda a informação que se considerou útil para o decorrer de cada simulação. Os dados do “Vento” e da “Turbina” a simular são introduzidos na aplicação por meio de ficheiros “.txt”. Estes ficheiros, um referente ao vento e outro referente à turbina, deverão estar situados no mesmo directório que a aplicação.

A aplicação encontra-se preparada para dois tipos diferentes de simulação do vento. Este poderá ser introduzido por uma função sinusoidal mais constante, ou por registo de velocidades de vento ao longo do tempo. Para cada tipo de simulação do vento, o ficheiro “.txt” terá uma determinada estrutura que poderá ser visualizada no botão de ajuda “?” que se encontra ao lado do botão “Procurar” na parte da interface referente ao “Vento”. Essa mesma estrutura encontra-se no Anexo A.

Para carregar o ficheiro do vento na aplicação é necessário introduzi-lo através do botão “Procurar” na parte da interface referente ao “Vento”.

O mesmo acontece em relação ao ficheiro da turbina. Na parte da interface referente à “Turbina” é, também, possível introduzir o ficheiro correspondente através do botão “Procurar”. O ficheiro é igualmente “.txt” e a sua estrutura pode ser visualizada no botão de ajuda “?” da parte da interface referente à “Turbina”. Esta mesma estrutura encontra-se descrita em detalhe no Anexo B. Este ficheiro contém dados da turbina tais como: a curva do coeficiente de binário, C_M ; o raio da turbina em metros; a constante de atrito estático; a constante de atrito dinâmico e o momento de inércia da turbina.

Inseridos os ficheiros referentes ao vento e à turbina, a aplicação encontra-se pronta para iniciar a simulação. Para isso, é necessário clicar no botão “Iniciar Simulação”. Caso exista alguma dúvida, existe também o botão de ajuda “?”, ao lado do botão “Iniciar Simulação”, com instruções de utilização.

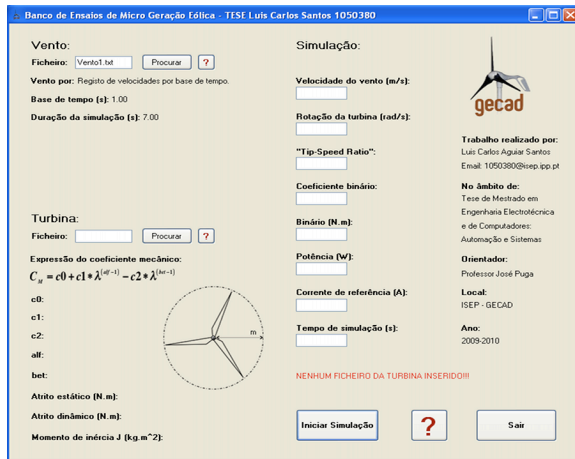
Iniciando-se a simulação, será possível visualizar todos os dados referentes ao vento e à turbina que se encontram em simulação. Também é possível verificar na parte do “Vento” a duração da simulação. Na parte da “Simulação” poderá verificar-se os valores: da velocidade do vento; da rotação da turbina; da relação da velocidade tangencial da turbina e da velocidade do vento, “*TIP Speed Ratio*”; do coeficiente de binário; do binário; da potência; da corrente de referência e do tempo de simulação. Na Figura 28 – C, é possível verificar toda esta informação.

Implementaram-se também algumas mensagens de “ERRO”. No caso de se clicar no botão “Iniciar Simulação” e não esteja inserido um dos ficheiros do vento ou da turbina, ou algum deles não esteja com a estrutura correcta, é visível uma mensagem de erro a vermelho por cima do botão “Iniciar Simulação”. Na Figura 28 – A e B, é possível verificar dois exemplos de mensagens de “ERRO”, respectivamente, o erro da inexistência do ficheiro da turbina e o erro na estrutura do ficheiro de vento.

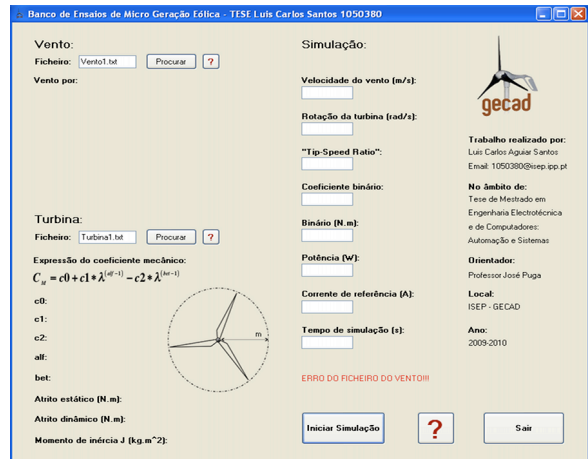
Além das mensagens de “ERRO”, implementou-se também um sinal de “ALARME” accionando-se sempre que seja atingida a velocidade máxima do motor CC do simulador. Atingida essa velocidade, cerca de 209 rad/s, deixam de ser válidos ou credíveis os dados registados nesses instantes. O mesmo acontece quando é atingida a corrente máxima de referência, 10 A. Como exemplo, na Figura 28 – D, é possível verificar a mensagem de

“ALARME”, evidenciando com fundo vermelho a caixa de texto da “Rotação da turbina (rad/s)”, referente à velocidade de rotação máxima da turbina. Poderá dar-se o caso de ambas as situações acontecerem na mesma simulação. Nesse caso, é dado o sinal de “ALARME” juntamente com as duas mensagens referentes a cada uma das situações.

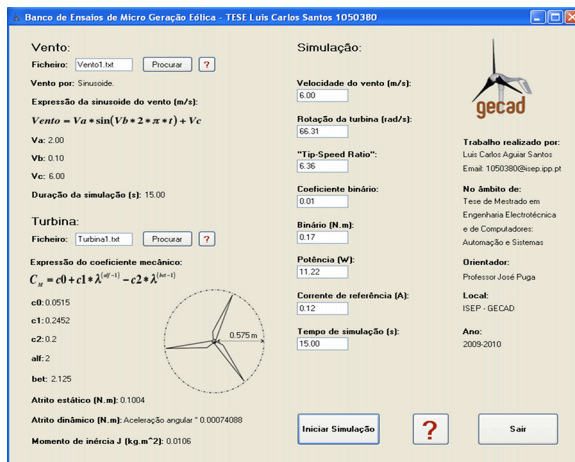
Por fim, para sair da aplicação, utiliza-se o botão “Sair” ou mesmo o “X” da própria janela “Windows”.



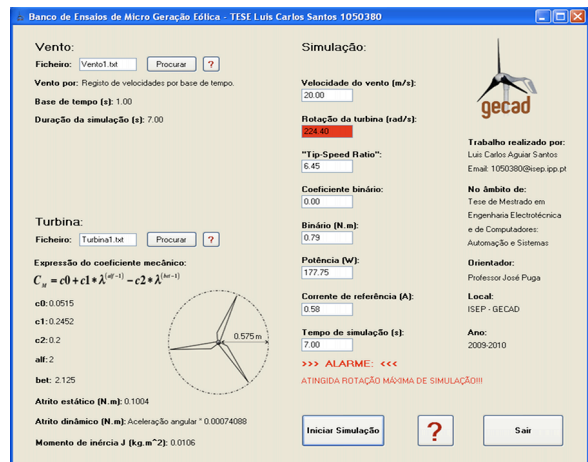
A



B



C



D

Figura 28 Mensagem de “ERRO” de inexistência do ficheiro da turbina (Figura A). Mensagem de “ERRO” da estrutura do ficheiro do vento (Figura B). Aspecto normal da simulação(Figura C). Mensagem de “ALARME” da velocidade máxima do motor CC do simulador atingida(Figura D).

4.3.2. SIMULADOR DA TURBINA E DO VENTO

Para uma visão geral do funcionamento da aplicação do simulador da turbina e do vento, na Figura 29, encontra-se representado um fluxograma do funcionamento do código da mesma. Nele, não se encontram representadas as iterações com a interface gráfica, mensagens de erro, mensagens de alarme, nem outros pormenores que tornariam o fluxograma demasiado longo.

Como podemos verificar no fluxograma presente na Figura 29 a aplicação começa por inicializar a placa PCI-6010, iniciando também constantes e variáveis necessárias ao programa. De seguida, não considerando o código responsável pela procura dos ficheiros através da interface gráfica, vai ler o ficheiro do “Vento” procurado. É averiguado logo à partida pelo primeiro carácter do ficheiro “.txt” de que tipo de simulação do vento se trata, activando-se ou não uma “flag”. Caso o carácter não seja “1” ou “0”, é visível uma mensagem de “ERRO” na interface gráfica. Depois são inicializadas as variáveis correspondentes aos dados da turbina durante a leitura do ficheiro da “Turbina”.

Para a gravação dos dados da simulação, é aberto um ficheiro com o nome “Dados.txt” que se encontrará no mesmo directório da aplicação. Caso ele não exista, é criado um com o mesmo nome. No fim de cada simulação ficam gravados os dados correspondentes nesse ficheiro até que uma nova simulação seja realizada. Antes de ser iniciado o ciclo principal, é guardado o tempo de relógio do computador para que a partir desse momento seja possível contabilizar o tempo de simulação.

Entrando agora no ciclo principal, uma função da placa PCI irá permitir ler a rotação do encoder acoplado ao motor CC, através do canal E32, retornando a largura do pulso em segundos e permitindo assim calcular a velocidade de rotação, ou seja, a velocidade angular. Esta função terá influência no tempo de ciclo pois o tempo de leitura de um pulso depende da velocidade de rotação. Quando a velocidade é próxima de zero o tempo de leitura poderá atingir o tempo de “Time Out” da função. Nesse caso, a velocidade de rotação será considerada nula e a execução do programa passa para a instrução seguinte onde é calculado o tempo de simulação.

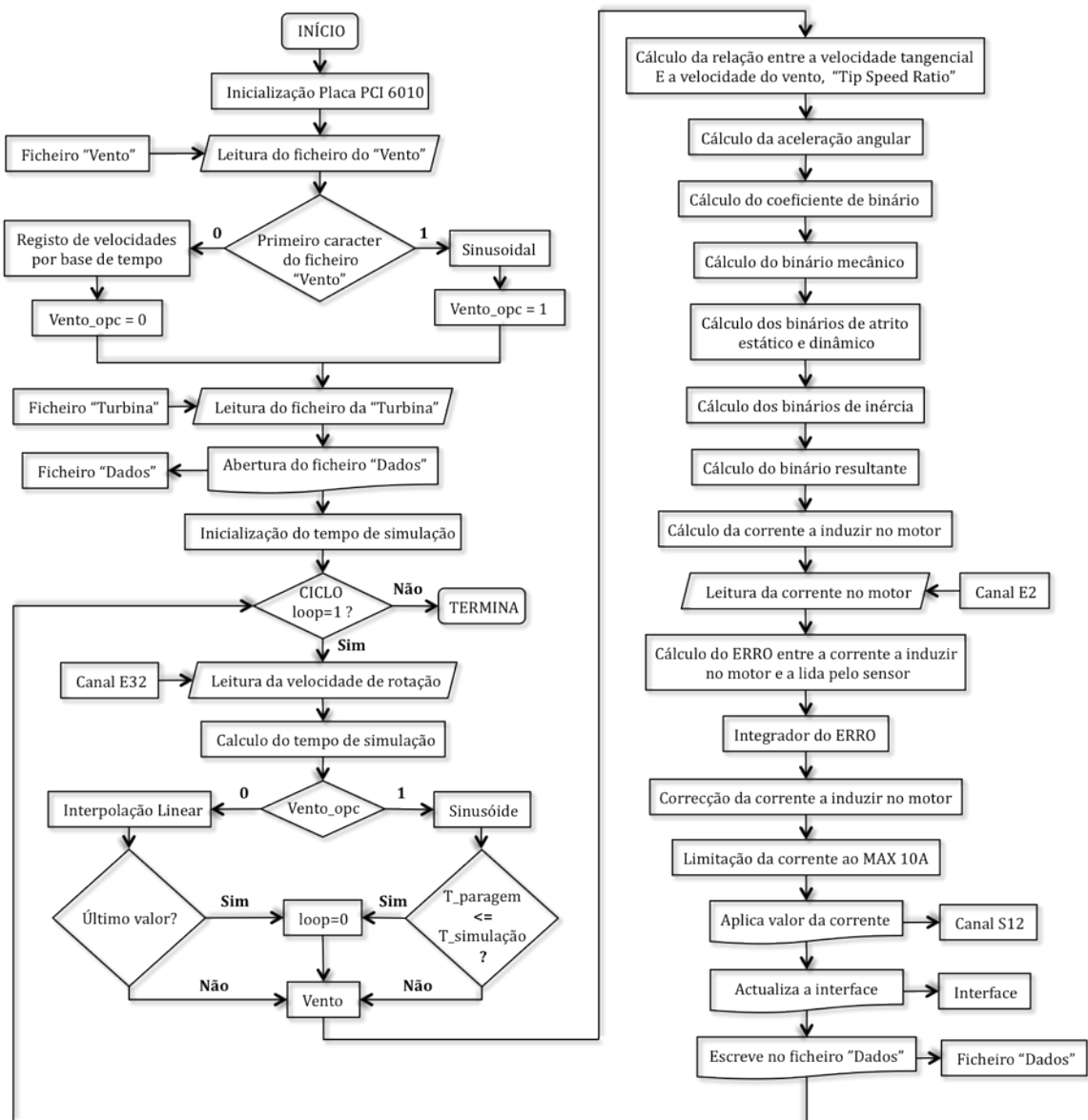


Figura 29 Fluxograma do funcionamento do código C++ da aplicação desenvolvida.

De seguida, verifica-se a activação da “flag” do tipo de simulação do vento, “Vento_opc”. Se activada, será simulado o vento pela expressão da Equação 37:

$$Vento = Va * \sin(Vb * 2 * \pi * t_simulação) + Vc \quad (m/s) \quad \text{Equação 37}$$

sendo: Va , a amplitude da sinusoidal, Vb , o número de períodos por segundo e Vc , a constante que representa a velocidade média do vento. Os valores destes parâmetros encontram-se no ficheiro do vento introduzido, assim como a duração da simulação. Caso a duração da simulação seja menor ou igual ao tempo de simulação, é colocado o valor “0” na variável “loop”, o que fará com que o ciclo termine quando chegar novamente à condição inicial.

Caso a “flag” do tipo de simulação do vento não esteja activada, será simulado o vento por registo de velocidades de vento por base de tempo. As velocidades e a base de tempo encontram-se no ficheiro do vento introduzido. Esta simulação consiste em aplicar cada uma das velocidades considerando a base de tempo. Para que a velocidade de simulação não seja alterada repentinamente na mudança de cada intervalo da base de tempo, realiza-se uma interpolação linear em cada intervalo. Neste tipo de simulação, o fim da simulação é determinado pela simulação da última velocidade existente no ficheiro do vento, fazendo com que seja colocado o valor “0” na variável “loop”. Porém, a aplicação calcula também a duração da simulação pelo número de velocidades medidas e pela base de tempo, servindo este valor apenas como informação para a interface gráfica.

Obtendo-se o valor do vento, V_I , calcula-se a razão entre a velocidade tangencial das pás da turbina e a velocidade do vento, ou seja, o *TIP Speed Ratio*, λ , pela Equação 23. A velocidade tangencial é calculada pelo produto da velocidade angular, ω , com o raio, r , da turbina.

De seguida, calcula-se a aceleração angular, α_n . Para tal, usa-se uma matriz circular de tamanho $4N$, inicializada a zeros. O valor de N encontra-se definido no código da aplicação com o valor 150. O valor da variável de contagem n é incrementado a cada ciclo até atingir N . Na matriz circular, em cada índice n , é escrito o tempo de simulação, $t_simulação$, na primeira posição; a velocidade angular, ω , na segunda; a aceleração angular, α , na terceira e na quarta posição é registada a aceleração angular filtrada, α_f . A aceleração angular, α_n , para um determinado índice n , é calculada pela Equação 38:

$$\alpha_n = \frac{\omega_n - \omega_{n-1}}{t_simulação_n - t_simulação_{n-1}} \quad (rad / s^2) \quad \text{Equação 38}$$

Durante o desenvolvimento da aplicação verificou-se que aceleração angular calculada apenas de acordo com a Equação 38 continha muito ruído. Então, realizou-se um filtro passa-baixo para retirar esse ruído. O filtro realizado não é mais do que uma média ponderada dos últimos NF valores da aceleração angular. É de salientar que o período de amostragem proporcionado pela placa de aquisição de dados não é constante. O valor de NF é definido no código da aplicação com o valor 20. A aceleração angular filtrada, α_{fn} , para um determinado índice n , calcula-se então pela Equação 39:

$$\alpha_{fn} = \frac{\sum_{i=1}^{NF} [\alpha_{n-i+1} * (t_{simulação_{n-i+1}} - t_{simulação_{n-i}})]}{t_{simulação_n} - t_{simulação_{n-NF}}} \quad (rad / s^2) \quad \text{Equação 39}$$

Chega-se agora aos cálculos referentes às características da turbina. Para o cálculo do binário produzido por uma turbina, necessita-se do valor do coeficiente de binário, C_M . Este é obtido a partir da curva do C_M de cada turbina. Nesta curva, como já foi descrito na subsecção 3.1.2, o valor de C_M encontra-se em função do *TIP Speed Ratio*, λ , ou seja, da razão entre a velocidade tangencial das pás, ωr , e a velocidade do vento V_I . Nesta aplicação implementou-se apenas um, embora seja possível e fácil adaptar a mesma aplicação a outros modelos representativos da curva C_M , em função de λ . O modelo implementado na aplicação é o representado na Equação 28:

Os valores das constantes $c0$, $c1$, $c2$, alf e bet são introduzidos na aplicação pelo ficheiro da turbina. Tem-se assim o valor do C_M , substituindo λ na Equação 28. Seguidamente, calcula-se o binário T_M da turbina pela Equação 27. Para um maior rigor da simulação, são tidos em conta os binários de atrito dinâmico e estático do motor CC utilizado no banco de ensaios e da turbina a simular, bem como os binários de inércia de ambos.

No que diz respeito ao motor CC, mostrou-se necessário realizar alguns testes para obter-se os valores da constante mecânica, K_m , constante de atrito estático, K_{e_mot} , constante de atrito dinâmico, K_{d_mot} , e momento de inércia, J_{mot} .

Para o cálculo de K_m , realizou-se o procedimento já descrito na secção 3.3. Com um ohmímetro, mediu-se a resistência dos enrolamentos do motor, R_a , onde se obteve o valor $R_a = 2,2 \Omega$.

Depois, realizou-se um ensaio em vazio, registando os valores da tensão aplicada, V_t , da corrente, I_a , e da velocidade angular, ω_m , presentes na Tabela 1. Com esses dados e usando a Equação 35 determinou-se o K_m para cada conjunto de dados. Por fim, realizou-se a média dos valores obtidos de K_m e obteve-se o valor $K_m = 0,684 N.m/A$. A Tabela 1 apresenta os dados utilizados neste cálculo.

Tabela 1 Ensaio do motor CC do banco de ensaios em vazio

V_t (V)	I_a (A)	ω_m (rad/s)	K_m (N.m/A)
10	0,15	13,8230	0,6996
15	0,155	21,3628	0,6862
20	0,16	28,6932	0,6848
25	0,17	36,2330	0,6797
30	0,175	43,3540	0,6831
35	0,18	50,7891	0,6813
40	0,185	58,1195	0,6812
45	0,193	65,4498	0,6811
50	0,199	72,7802	0,6810
55	0,202	79,5870	0,6855
60	0,208	87,4410	0,6809
$K_m \approx$			0,684

Para as constantes de atrito estático e dinâmico, K_{e_mot} e K_{d_mot} , respectivamente, realizou-se um ensaio com o motor em vazio, injectando uma corrente no motor variável linearmente de 0 a 390 mA, em 300 s. De seguida, realizou-se um ensaio semelhante mas variando a corrente de 390 a 0 mA. Dos ensaios, registaram-se os valores da velocidade angular e da corrente presentes no gráfico da Figura 30. O ensaio foi feito em 300 s para que a velocidade angular variasse lentamente e, assim, se anulasse a aceleração angular e consequentemente o efeito do momento do rotor fosse minimizado. Como se pode ver na Figura 30, apesar da velocidade angular variar lentamente, para cada velocidade angular é necessária uma corrente diferente, dependendo se o motor se encontra a acelerar ou a desacelerar. Assim, ao acelerar, no ensaio registado na curva a azul, para que seja atingida uma dada velocidade, necessitou-se de uma corrente superior, em comparação com a mesma velocidade ao desacelerar, no ensaio registado na curva a verde. Pretendendo-se determinar o atrito estático e dinâmico do motor CC, para que este pudesse ser compensado, realizou-se uma aproximação linear passando por dois pontos da curva referente ao ensaio em desaceleração, visto que se aproximava a uma recta.

Desta forma, ao se usar o ensaio referente à desaceleração em vez do ensaio de aceleração, a compensação fez-se por defeito e não por excesso. Desta forma, os ensaios realizados no banco de ensaios serão válidos mesmo na pior das situações. Assim, uma determinada turbina simulada terá na realidade um rendimento igual ou superior obtido por meio da simulação, isto para as mesmas condições de vento.

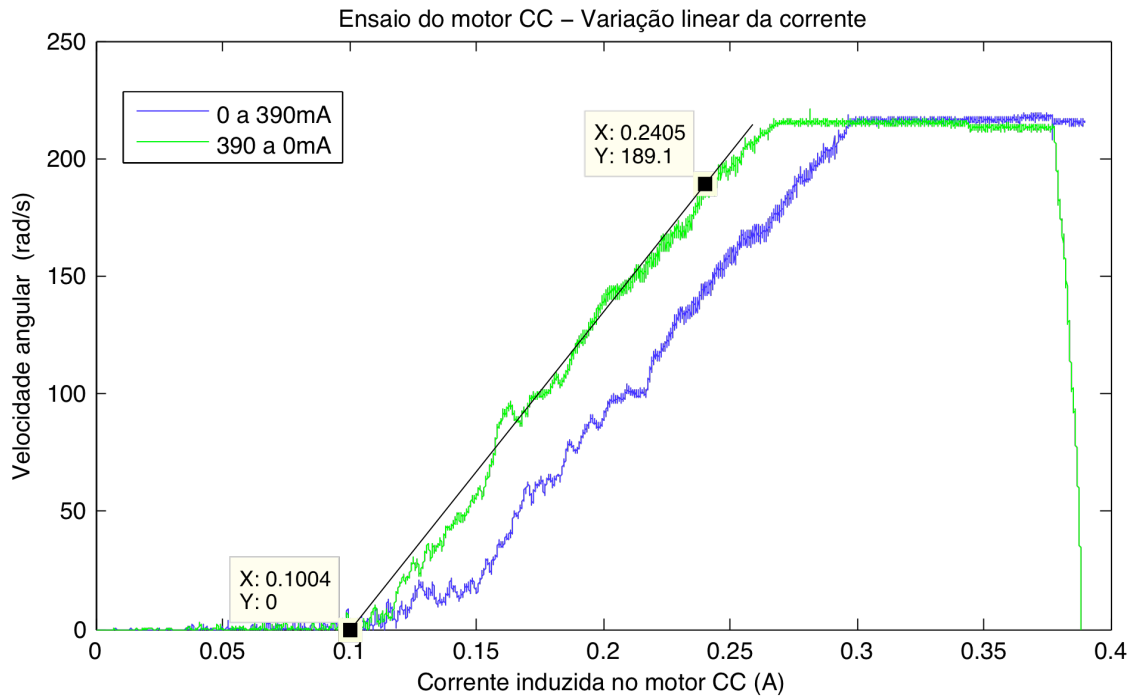


Figura 30 Ensaio do motor CC variando a corrente linearmente em 300s.

Tendo os pontos da recta, calculou-se a sua equação para que esta fosse implementada na aplicação compensando o atrito do motor CC, Equação 40.

$$I_{Compensação_Motor} = 0,00074088 * \omega + 0,1004 \quad (A) \quad \text{Equação 40}$$

Assim, fica-se com $K_{e_mot} = 0,1004$ e $K_{d_mot} = 0,00074088$.

Separando os binários de atrito usando a Equação 31, que relaciona corrente com binário para o motor utilizado, tem-se o binário de atrito estático do motor, $T_{a_e_mot}$ na Equação 41.

$$T_{a_e_mot} = K_{e_mot} * K_m = 0,1004 * 1,368 \quad (N.m) \quad \text{Equação 41}$$

O binário de atrito dinâmico, $T_{a_d_mot}$ é dado pela Equação 42.

$$T_{a_d_mot} = K_{d_mot} * \omega * K_m = 0,00074088 * \omega * 1,368 \quad (N.m) \quad \text{Equação 42}$$

Para o cálculo da inércia do motor, J_{mot} , realizou-se um outro ensaio. Neste, foi induzida uma corrente de referência constante de 1 A e o ensaio realizou-se já com a compensação dos binários de atrito do motor. Tal como no ensaio anterior, registaram-se os dados em gráficos. No gráfico da Figura 31, representa-se a corrente efectiva no motor CC em função do tempo.

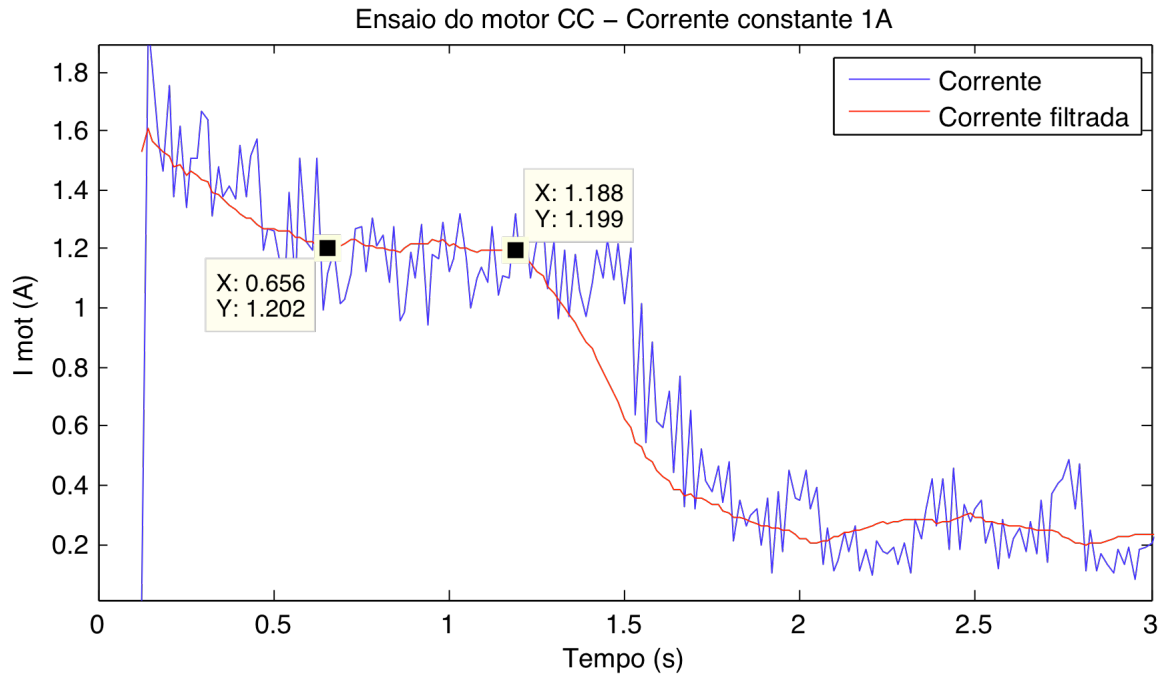


Figura 31 Ensaio do motor CC com corrente constante de 1A, corrente em função do tempo.

A corrente estabiliza em cerca de 1.2 A entre os 0.656 s e os 1.188 s e não em 1 A. Este facto deve-se à compensação do atrito do motor CC já estar implementada. Com isso, torna-se possível analisar o ensaio como se não existisse atrito, considerando que a corrente responsável para acelerar o motor é de apenas 1 A, então, é essa a corrente responsável por movimentar a inércia do motor. Sabendo-se a corrente e utilizando a Equação 31, é possível calcular o binário realizado pelo motor, correspondente à inércia, Equação 43.

$$T_{J_mot} = I * K_m = 0.684 \quad (Nm)$$

Equação 43

Sabendo-se o intervalo onde a corrente estabiliza no valor de referência, torna-se possível identificar esse mesmo intervalo no gráfico da Figura 32, onde se representa a velocidade angular em função do tempo. Com os dados presentes no gráfico da Figura 32 é possível calcular a aceleração angular nesse intervalo, visto ser uma aceleração constante, embora com algum ruído. Pela Equação 44, obtém-se então o valor de $\alpha = 128.63 rad/s^2$.

$$\alpha = \frac{\Delta \omega}{\Delta t} \quad (rad / s^2)$$

Equação 44

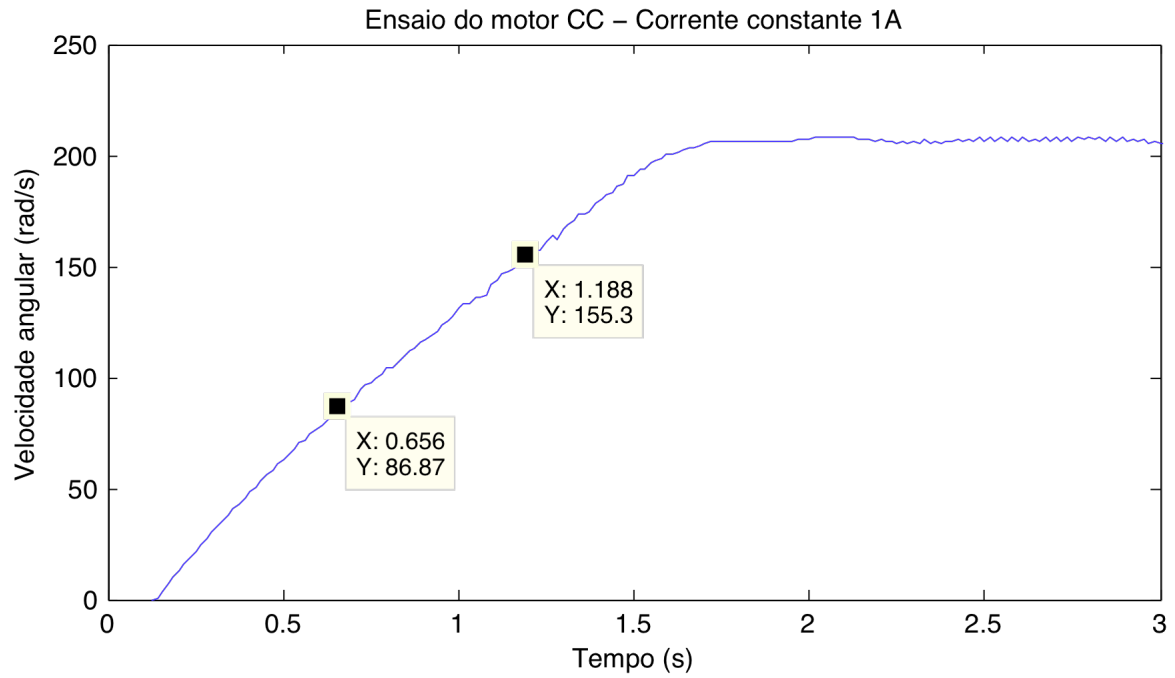


Figura 32 Ensaio do motor CC com corrente constante de 1A, velocidade angular em função do tempo.

A partir da Equação 45, calcula-se o momento do motor CC, $J_{mot}=0,0106 \text{ kg.m}^2$.

$$T_{J_mot} = \alpha * J_{mot} \quad (Nm) \Leftrightarrow J_{mot} = \frac{T_{J_mot}}{\alpha} \quad (kg.m^2) \quad \text{Equação 45}$$

Tem-se assim a expressão do binário de inércia do motor CC, T_{J_mot} , na Equação 46:

$$T_{J_mot} = \alpha * 0,0106 \quad (Nm) \quad \text{Equação 46}$$

Para o cálculo dos binários de atrito referentes à turbina, são introduzidas na aplicação as constantes de atrito estático e dinâmico da turbina, assim como o valor do seu momento de inércia, através do ficheiro da turbina. Estes binários são calculados usando as mesmas expressões dos binários de atrito do motor CC, obtendo-se assim o binário de atrito estático, $T_{a_e_turb}$, o binário de atrito dinâmico, $T_{a_d_turb}$ e o binário de inércia, T_{J_turb} , da turbina. Por fim, o binário resultante imposto pelo banco de ensaios é calculado pela Equação 36.

Como o controlo do binário é feito pelo controlo de corrente no motor CC, calcula-se a corrente de referência, I_{mot_ref} , a induzir no motor, pela Equação 47:

$$I_{mot_ref} = \frac{T_{M_res}}{K_m} \quad (A) \quad \text{Equação 47}$$

De seguida, é lida a corrente que efectivamente passa no motor, I_{mot} . Esta é lida pelo canal E2 da placa PCI através de um sensor de corrente com um $offset_{sensor} \approx 0,026V$. Este valor é tido em conta na medição da corrente, para uma leitura mais precisa.

Durante o desenvolvimento, sentiu-se a necessidade de implementar um controlador para a corrente de maneira a que fosse induzida a corrente pretendida, ou seja, I_{mot_ref} . Então, implementou-se um controlador que inicialmente calcula o erro entre a corrente de referência e a corrente que efectivamente passa no motor, $Erro_I$, pela Equação 48, e depois corrige a corrente a induzir no motor.

$$Erro_I = I_{mot_ref} - I_{mot} \quad (A) \quad \text{Equação 48}$$

Usa-se um vector circular de tamanho NJ , inicializado com zeros. A constante NJ encontra-se definida no código da aplicação com o valor 200. O valor do erro é multiplicado pelo tempo de ciclo correspondente, pois esse tempo é variável. Em cada ciclo é incrementado o índice do vector circular. Após incrementado o índice do vector, este é guardado numa variável, $Erro_I_mais_antigo$, o valor do erro que se encontra nessa posição do vector, já guardado anteriormente, é o valor do erro mais antigo do vector circular. Isto é realizado antes de ser guardado nessa mesma posição o erro actual, $Erro_I_actual$. Inicialmente, o $Erro_I_mais_antigo$ será sempre igual a zero já que o vector é inicializado esse valor. Deixará de o ser, assim que o vector seja todo preenchido com valores de erro. De seguida, é feita a integração do erro com a Equação 49:

$$Int_Erro_I = Int_Erro_I + (Erro_I_actual - Erro_I_mais_antigo) \quad (A). \quad \text{Equação 49}$$

Depois, através do canal S12 da placa PCI, é colocado o valor de tensão, $I_{Corrigida}$, correspondente ao valor de corrente a induzir o motor, no circuito de controlo. O valor dessa corrente é corrigido utilizando então o controlador da seguinte forma, Equação 50:

$$I_{Corrigida} = I_{mot_ref} * K_0 + Int_Erro_I * K_i + offset_{sensor} \quad (V). \quad \text{Equação 50}$$

As constantes K_0 e K_i usam-se para ajustar o controlador e são definidas no código da aplicação, como $K_0=1$ e $K_i=2$. O $offset_{sensor}$ do sensor de corrente, tal como foi considerado

na leitura de corrente, é também considerado para a correcção. Assim, quanto mais crescer positivamente o $Erro_I$, o que significa que a corrente de referência, I_{mot_ref} , é cada vez maior relativamente à corrente no motor, I_{mot} , maior será o integral do erro, Int_Erro_I . Logo, a corrente a induzir no motor, $I_{Corrigida}$, terá um valor maior de maneira diminuir o erro entre a corrente de referência e a do motor. Para a situação oposta, a corrente de referência ser menor que a corrente no motor, $I_{Corrigida}$ tomará um valor menor de maneira a igualar a corrente do motor à corrente de referência.

A placa PCI usada tem uma amplitude de leitura e escrita de tensão -5 a 5V, mas apenas se usou uma amplitude de 0 a 5V, correspondendo na aplicação a uma amplitude de corrente de 0 a 10A, respectivamente. O circuito de controlo encontra-se desenhado tendo em conta esta correspondência. A limitação da corrente faz-se então pela limitação da tensão da placa, limitando a escrita de tensão de 0 a 5V e assim a corrente de 0 a 10A.

Chega-se então às últimas instruções do ciclo. Neste momento, a aplicação actualiza os valores na interface gráfica e realiza a escrita no ficheiro “Dados.txt” de todos os dados úteis para a análise dos resultados da simulação.

Agora, o ciclo voltaria à condição inicial. Poderia continuar ou terminar, dependendo da variável *loop* ser igual a “1” ou “0”, respectivamente. Caso *loop* seja “0”, a aplicação fecha o ficheiro de “Dados.txt” e escreve “0V” no canal E2 da placa PCI, realizando a paragem do sistema e concluindo assim a simulação.

4.3.3. ANÁLISE DO BANCO DE ENSAIOS

O banco de ensaios desenvolvido, permite testar micro geradores em laboratório, para diferentes turbinas e condições de vento. O ensaio realizado para esta avaliação consistiu numa carga mecânica aleatória. Desta forma, é possível analisar a coerência de inúmeros dados de simulação. Para isso, foi realizada uma função em *Matlab*, que permite visualizar todos os dados guardados pela aplicação descrita na subsecção anterior, através do ficheiro de texto “Dados.txt”, e que apresenta as características da turbina através do ficheiro “Turbina.txt”. Esta função chama-se “turbina” e para a executar basta escrever “turbina” no comando do *Matlab*. O código da função “turbina” encontra-se no Anexo C.

Para uma percepção mais rápida e organizada dos resultados de cada ensaio, a função “turbina” abre cinco janelas agrupando assim os gráficos referentes a cinco análises

distintas: Análise geral; Características da turbina; Atritos e inércias; Controle de corrente e de Tempo de ciclo e encoder.

Para uma análise geral do ensaio, pode usar-se a janela “Análise geral”, Figura 33, onde se pode verificar: a função do vento aplicada; a rotação da turbina; a aceleração da turbina; o coeficiente de binário; a relação entre a velocidade tangencial das pás e da velocidade do vento; a corrente de referência; o binário resultante e a potência resultante.

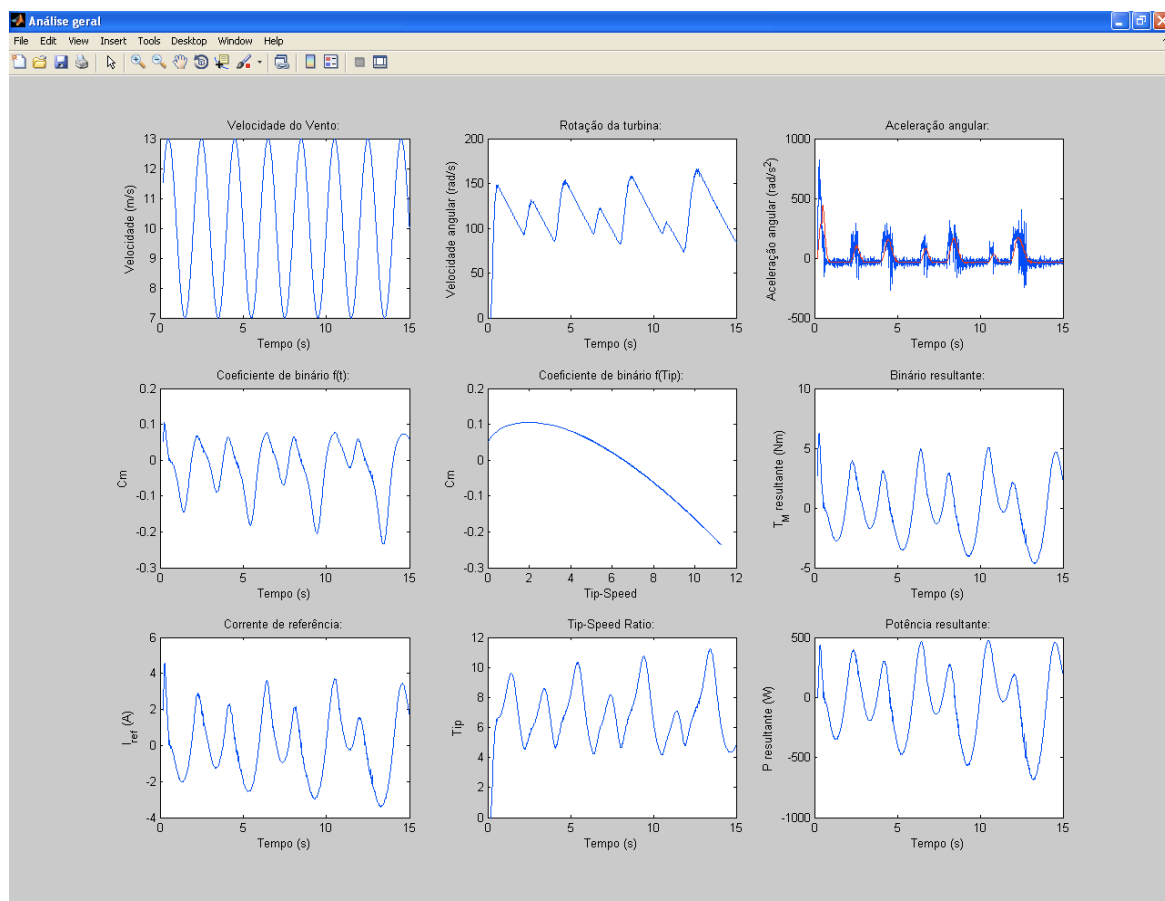


Figura 33 Janela “Análise geral”, da função “turbina” no Matlab.

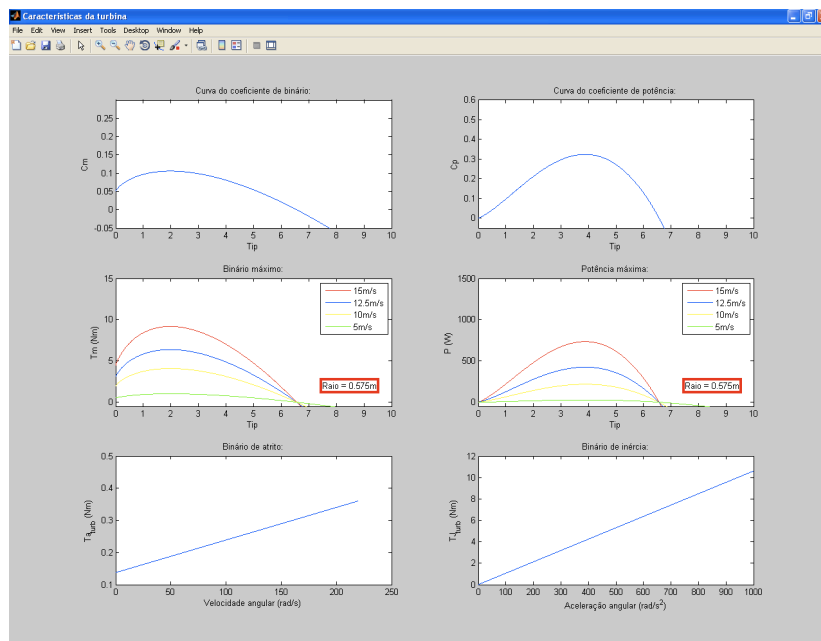


Figura 34 Janela “Características da turbina”, da função “turbina” no Matlab.

As características da turbina, podem ser vistas na janela, “Características da turbina”, Figura 34. Nesta encontra-se informação sobre: as curvas do coeficiente de binário e de potência; as curvas de binário máximo e de potência máxima; os binários de atrito e de inércia, assim como, o raio do rotor da turbina.

Na janela “Atritos e inércias”, Figura 35, pode verificar-se a influência dos binários de atrito e dos binários de inércia, no binário resultante.

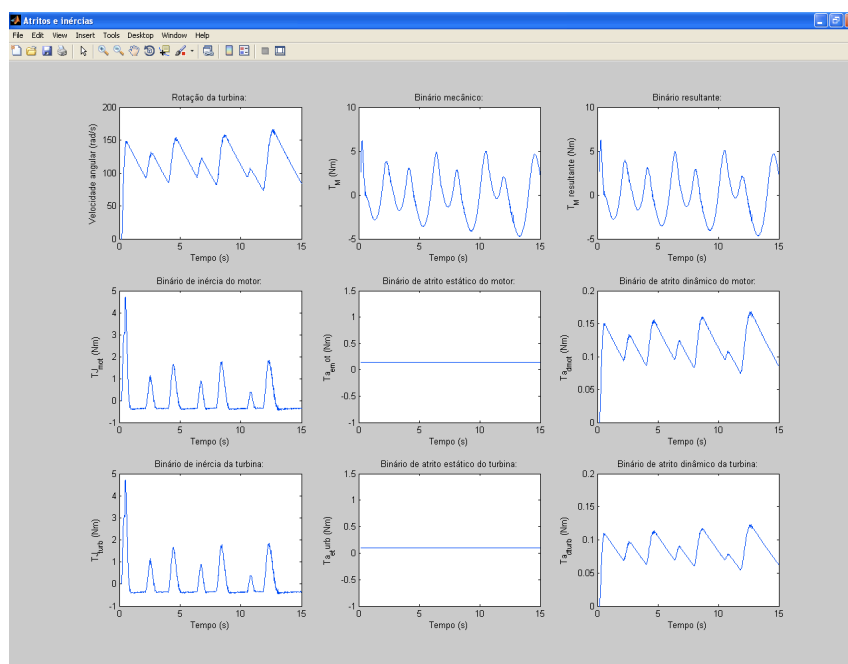


Figura 35 Janela “Atritos e inércias”, da função “turbina” no Matlab

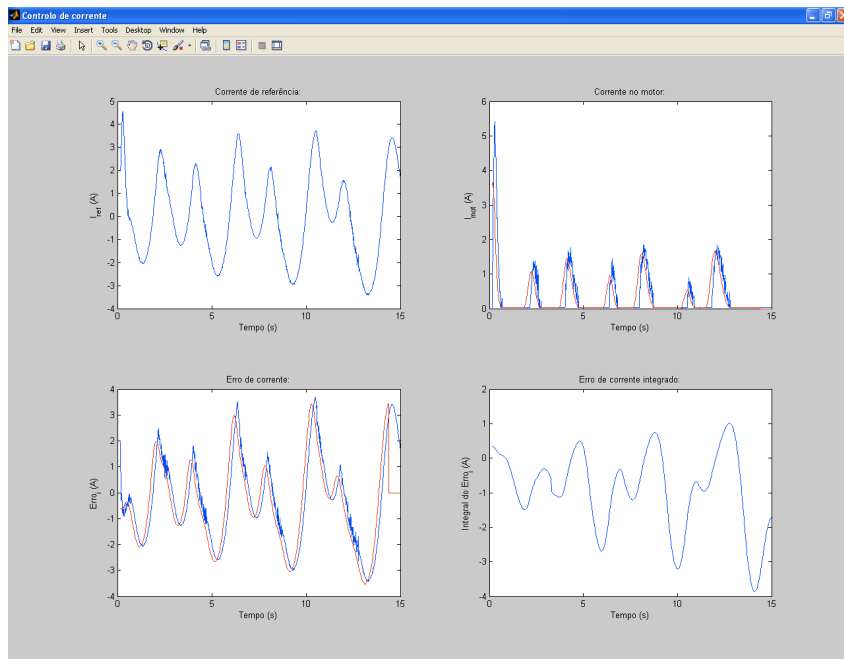


Figura 36 Janela “Controlo de corrente”, da função “turbina” no Matlab.

Quanto ao controlo de corrente, na janela “Controlo de corrente”, Figura 36, é possível verificar-se a corrente de referência e a corrente no motor, assim como o erro entre as duas.

Por fim, como o tempo de ciclo não é constante, na janela “Tempo de ciclo e encoder”, Figura 37, permite verificar o tempo de ciclo e de leitura do encoder, comparando-os também com a rotação da turbina.

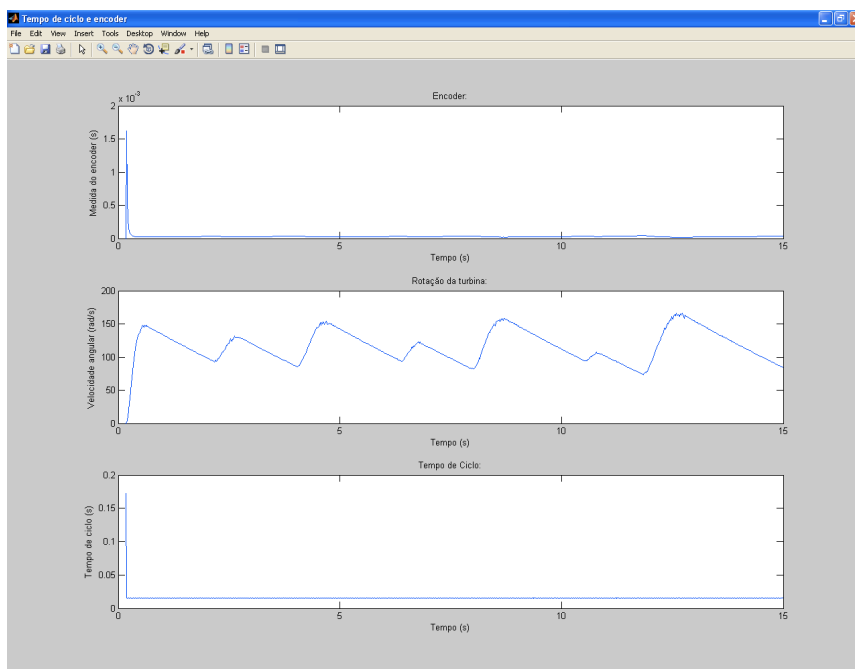


Figura 37 Janela “Tempo de ciclo e encoder”, da função “turbina” no Matlab.

Isto, porque a alteração do tempo de ciclo, está directamente relacionada com o tempo de leitura do encoder, que por sua vez, está relacionado com a rotação da turbina.

A partir desta análise gráfica, através desta aplicação, é possível avaliar cada situação simulada, confrontando a mesma com outras já simuladas, podendo assim retirar conclusões.

4.4. HARDWARE DESENVOLVIDO

O *hardware* e o *software* aqui apresentados foram desenvolvidos em conjunto, de forma a se complementarem mutuamente para perfazer os objectivos. No que diz respeito ao *hardware*, foi realizado um circuito de controlo do binário do motor CC, comunicando com a aplicação através da placa de aquisição e escrita de dados. O esquema do circuito encontra-se representado na Figura 38. Para um melhor entendimento deste esquema sombreou-se a diferentes cores as zonas com diferentes funções.

Como já se abordou nos capítulos anteriores o controlo do binário do banco de ensaios mais propriamente do motor CC é feito através do controlo de corrente. Para isso, fez-se o circuito apresentado na Figura 38, que ao receber “ordens” da aplicação desenvolvida em C++, controla o binário do motor. Descreve-se de seguida o funcionamento de todo o circuito da Figura 38.

O circuito tem dois terminais de saída e um de entrada para comunicação com a placa de aquisição de dados PCI-6010. Para a leitura da corrente no “Motor CC”, usou-se um sensor de corrente LA55-P, “Sensor de corrente”. De maneira a condicionar a medição de corrente com a amplitude de medição da placa PCI, deu-se cinco espiras na janela do sensor de corrente, amplificando o sinal cinco vezes, correspondendo assim 10 A na entrada a 5V na saída do sensor.

Quando é aplicado no terminal de entrada S12 (saída S12 da placa PCI), uma tensão proporcional ao binário requerido, esse sinal vai directo a um comparador, “Comparador 1”, juntamente com o sinal do “Sensor de corrente”. O sinal do “Sensor de corrente” entra também na “Placa de aquisição de dados” através do canal E2.

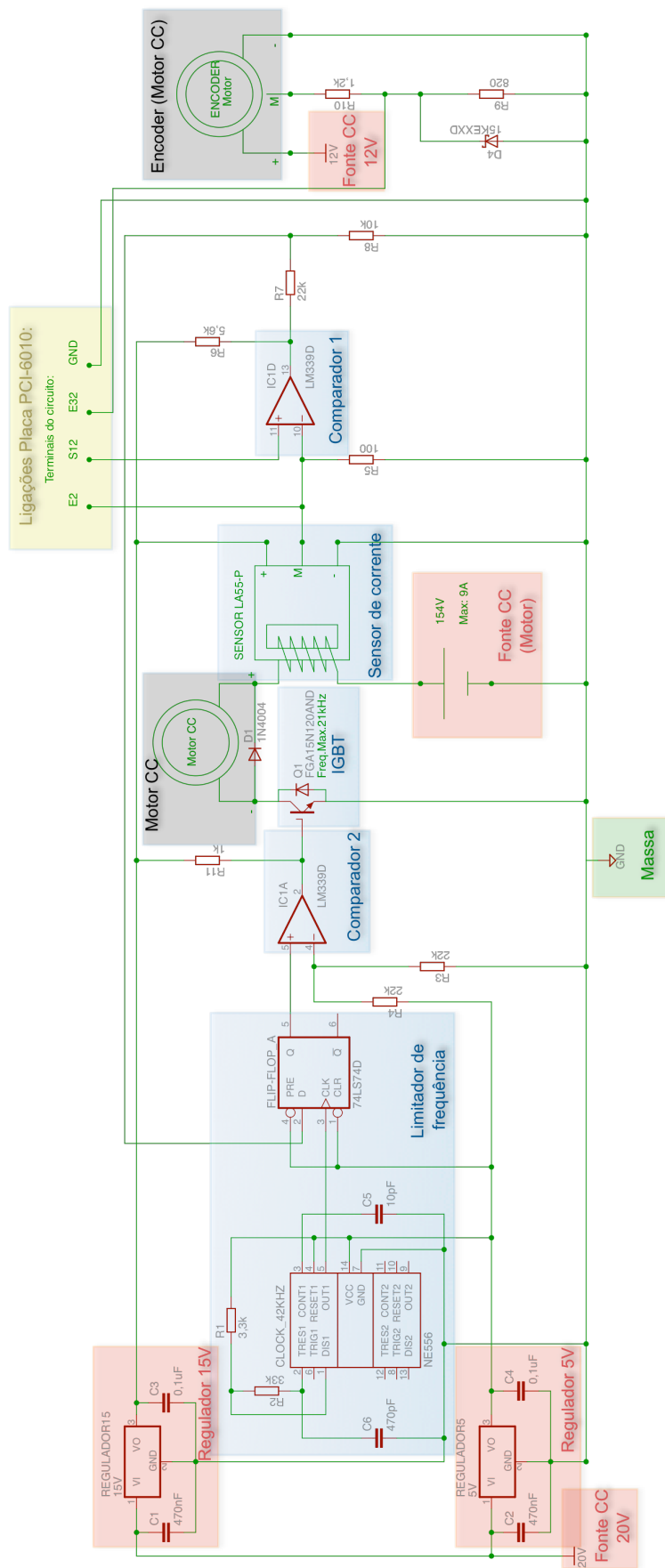


Figura 38 Esquema do circuito de controlo desenvolvido.

O sinal resultante do “Comparador 1”, com nível baixo ou alto, vai a um “Limitador de frequência”. Este limitador é constituído por um sinal de relógio a 42 kHz, que por sua vez entra na entrada de relógio de um *flip-flop*. Assim, o sinal do “Comparador 1” que entra no *flip-flop*, ficará à saída deste limitado a uma frequência de comutação de 21 kHz. O uso do “Limitador de frequência” deve-se à necessidade de limitar a frequência de comutação do “IGBT” que alimenta o “Motor CC”.

O sinal do “Comparador 1”, passando pelo “Limitador de frequência”, entra no “Comparador 2”, comparando o sinal com uma tensão de nível baixo. A saída deste comparador, acciona ou não o “IGBT”.

O “Motor CC” encontra-se acoplado a um “Encoder (Motor CC)”. O sinal de tensão desse encoder, é limitada a 4,7V por um divisor de tensão com diodo Zener, antes de entrar na “Placa de aquisição de dados” pelo canal E32.

O circuito é alimentado por uma fonte de corrente contínua de 20 V, “Fonte CC 20 V”. São usados dois reguladores de tensão, um de 5 V e um de 15 V, respectivamente “Regulador 5 V” e “Regulador 15 V”. O “Limitador de frequência” e o “Comparador 1”, são alimentados a 5 V. O “Sensor de corrente” e o “Comparador 2”, são alimentados a 15 V. O “Encoder (Motor CC)” é alimentado por uma fonte de corrente contínua de 12 V, “Fonte CC 12 V”. O “Motor CC”, é alimentado com uma fonte de corrente contínua de 154 V (Max: 9 A), “Fonte CC (Motor)”. Todo o circuito, incluindo o “Encoder (Motor CC)”, estão conectados a uma massa comum, “Massa”.

Fica assim descrito todo o desenvolvimento do banco de ensaios de micro geração eólica. Agora pode-se passar ao teste e validação do simulador perante múltiplas cargas e diversas condições de vento.

5. ANÁLISE PRÁTICA E VALIDAÇÃO DO BANCO DE ENSAIOS

Neste capítulo descreve-se e analisam-se alguns ensaios que permitem mostrar o bom desempenho do simulador. Nos diversos ensaios são utilizados diferentes valores de vento, diferentes turbinas e diferentes cargas.

É possível obter e analisar dados referentes ao comportamento de diferentes turbinas perante diferentes situações de vento e de carga. Para o efeito de simulação foram idealizadas três diferentes turbinas: A, B e C, todas do tipo C presente na Figura 21.

5.1. ENSAIOS DE UMA TURBINA PERANTE DIFERENTES CARGAS

Uma turbina com determinadas características atinge a sua potência máxima para uma determinada velocidade de vento, com uma determinada carga. O ensaio que se descreve de seguida mostra isso mesmo.

Na Figura 39, encontram-se representadas as curvas dos coeficientes de binário e de potência de uma turbina identificada por A. Na Figura 40, representa-se as curvas de binário máximo e de potência máxima para esta turbina com um raio de 0.325 m. Os cursores assinalam os pontos de binário máximo e de potência máxima para uma velocidade do vento de 12.5 m/s.

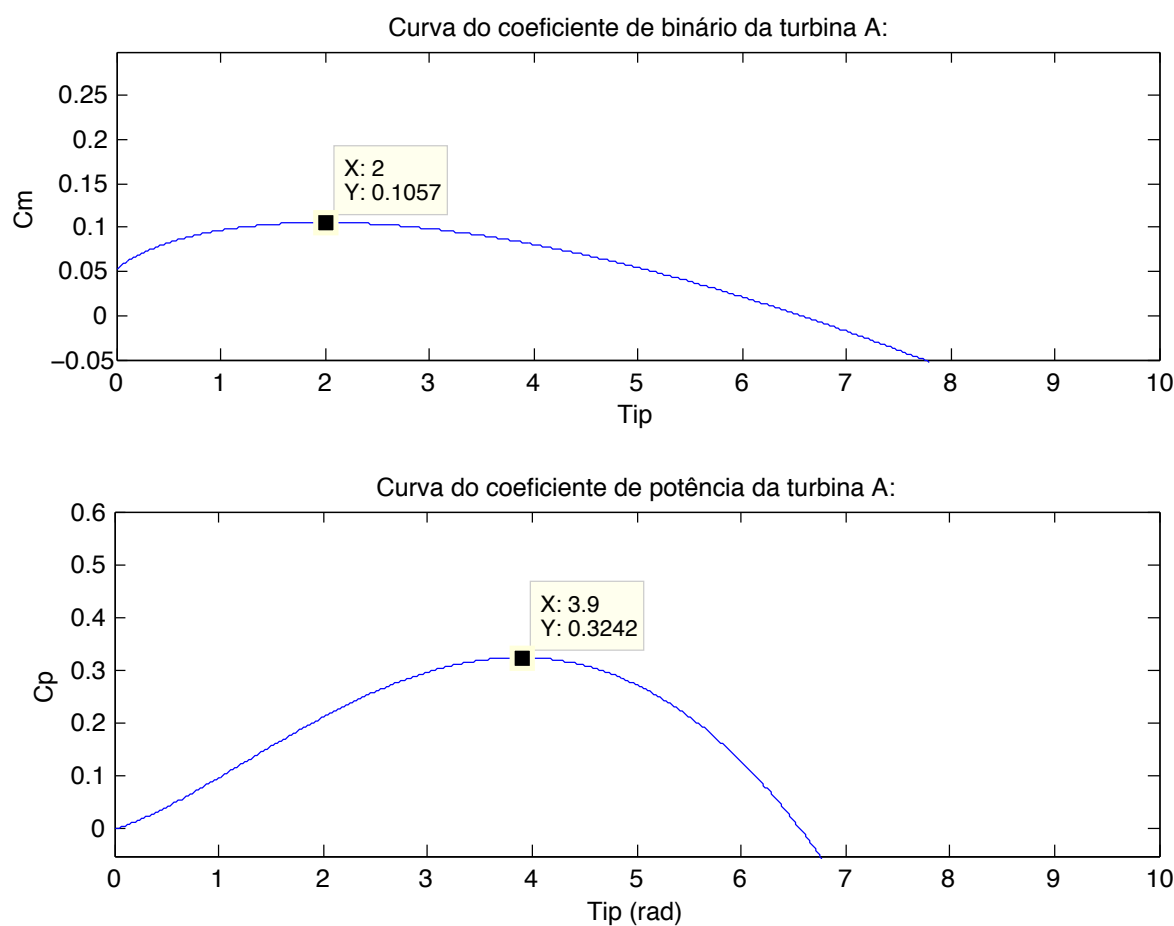


Figura 39 Curvas dos coeficientes de binário e potência da turbina A em função do *TIP Speed Ratio*.

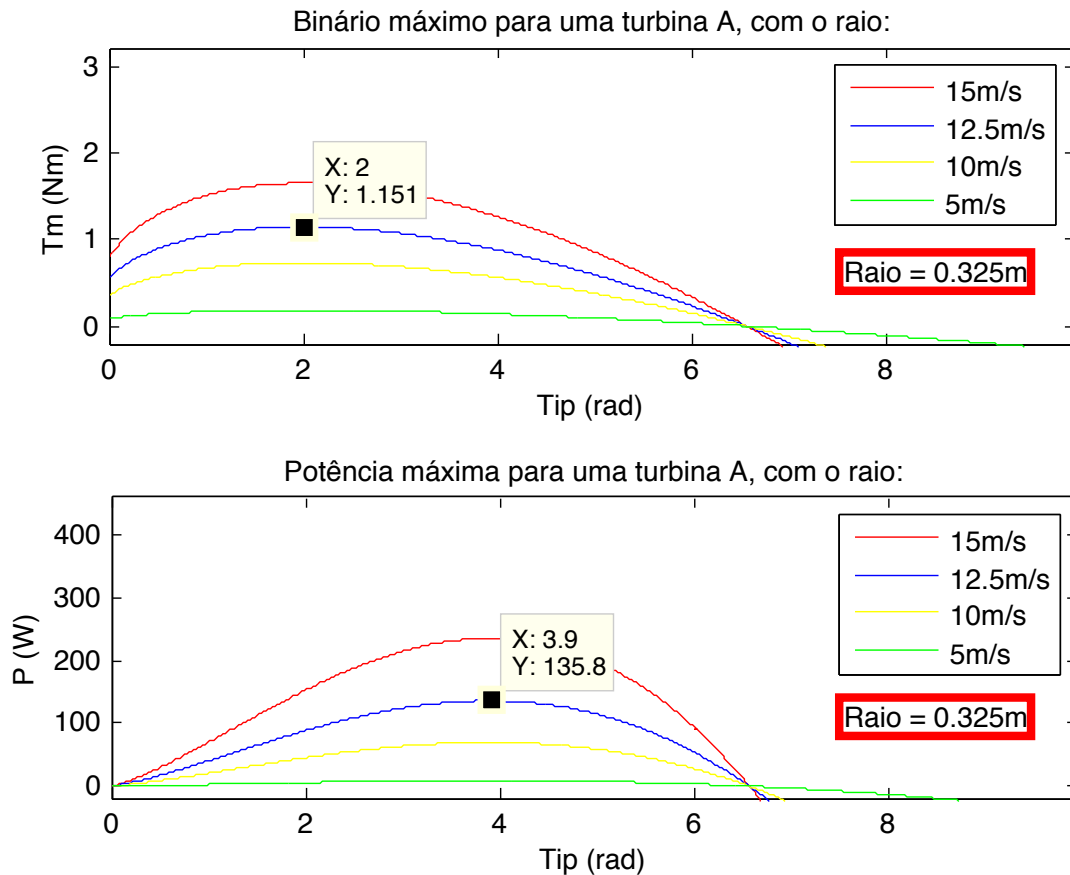


Figura 40 Binário máximo e potência máxima da turbina A em função do *TIP Speed Ratio*.

Neste ensaio usaram-se três cargas distintas no gerador acoplado ao banco de ensaios. Uma carga alta com o valor de 0.51Ω , uma carga intermédia de 1.03Ω e uma carga baixa de 2.06Ω . O valor de resistência dos enrolamentos do gerador, R_a , tem o valor de 0.2Ω . Assim, o valor de carga total, é dado por $R_a + R_n$. Fica-se então com uma carga alta de 0.71Ω , uma intermédia de 1.23Ω e uma baixa de 2.26Ω . A velocidade do vento foi constante e de 12.5 m/s e a duração do ensaio foi de 10 s . Na Figura 41, encontram-se representados alguns dos resultados dos quais se podem retirar conclusões importantes.

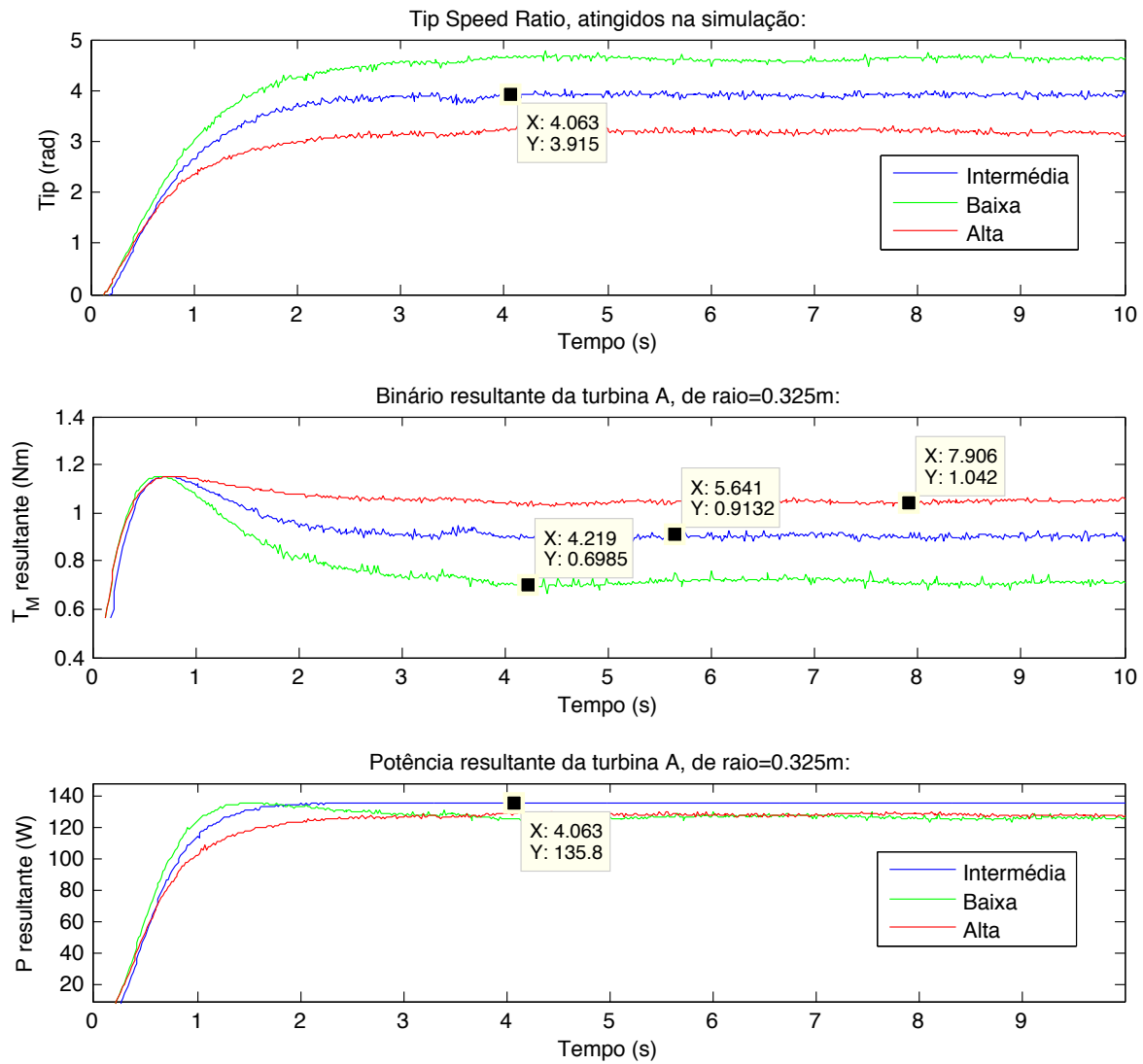


Figura 41 Resultados da simulação da turbina A para velocidade do vento de 12.5 m/s para três cargas diferentes. *TIP Speed Ratio*, binário e potência.

Como se pode observar nos resultados presentes na Figura 41, tendo em conta que foi simulado um vento constante de 12.5 m/s, para cada uma das cargas, o valor da relação entre a velocidade tangencial das pás do rotor e da velocidade do vento, ou seja, do *TIP Speed Ratio* (*TIP*), é diferente para cada uma das cargas. Para a carga intermédia atingiu-se um *TIP* de cerca de 3.9, que na Figura 39 corresponde ao coeficiente máximo da turbina A, sendo cerca de 0.3242. Esse mesmo *TIP*, na Figura 40, corresponde a uma potência máxima de cerca de 135.8 W para um raio de 0.325 m e uma velocidade de vento de 12.5 m/s. Para a carga alta e baixa, o valor da potência diminui, já que o valor do *TIP* é diferente do óptimo para a turbina em causa, o que faz com que o valor de potência seja inferior.

Em relação ao binário, a carga mais alta desenvolveu um valor mais elevado. Não porque é a carga mais elevada, mas sim porque provocou um valor de *TIP* mais próximo do valor de *TIP* para o qual a turbina A desenvolve binário máximo.

5.2. ENSAIO DE UMA TURBINA PERANTE VENTO VARIÁVEL

De seguida, realizou-se um outro ensaio, para a mesma turbina A com o mesmo raio de 0.325 m, mas para velocidade de vento variável de acordo com o gráfico presente na Figura 42. Este ensaio foi realizado, também, para cada uma das cargas, alta, intermédia e baixa. Os resultados deste ensaio encontram-se representados na Figura 43.

Como se pode observar na Figura 42 e na Figura 43, diferentes velocidades de vento, provocam diferentes valores de *TIP*, tal como seria de esperar.

Observando os valores do coeficiente de potência para cada uma das cargas, Figura 43, juntamente com as velocidades de vento da Figura 42, verifica-se que, para uma dada velocidade de vento, o valor do coeficiente de potência é mais elevado para uma determinada carga. Por exemplo, com uma velocidade do vento de 8 m/s verifica-se que a carga baixa (linha verde) é a carga a que corresponde um valor do coeficiente de potência mais elevado, cerca de 0.3094. Sendo maior o coeficiente de potência maior é a potência gerada na turbina, 33.97 W.

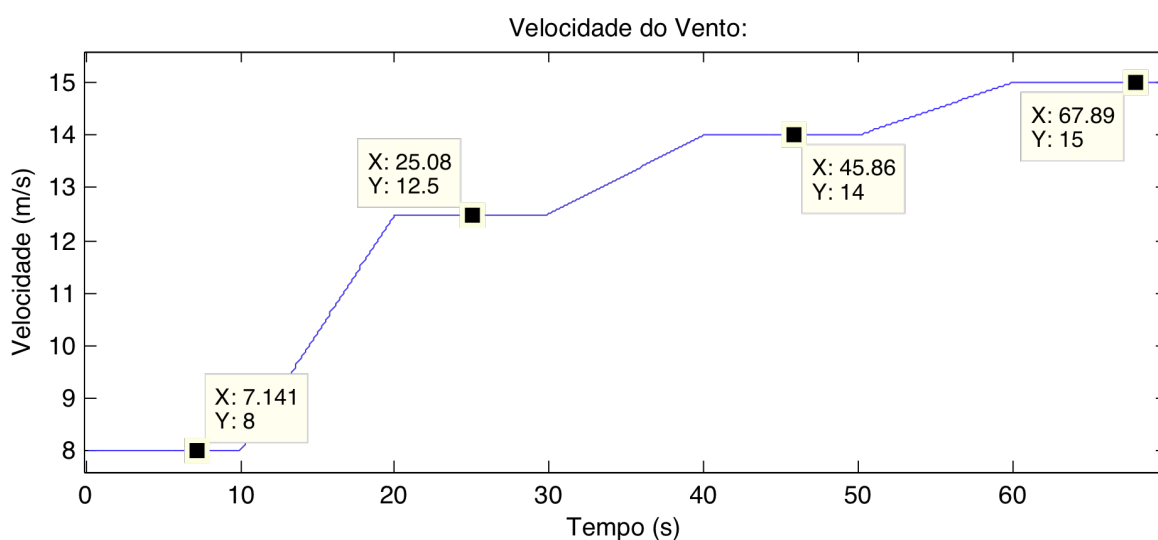


Figura 42 Velocidade do vento em função do tempo utilizado no ensaio da turbina A.

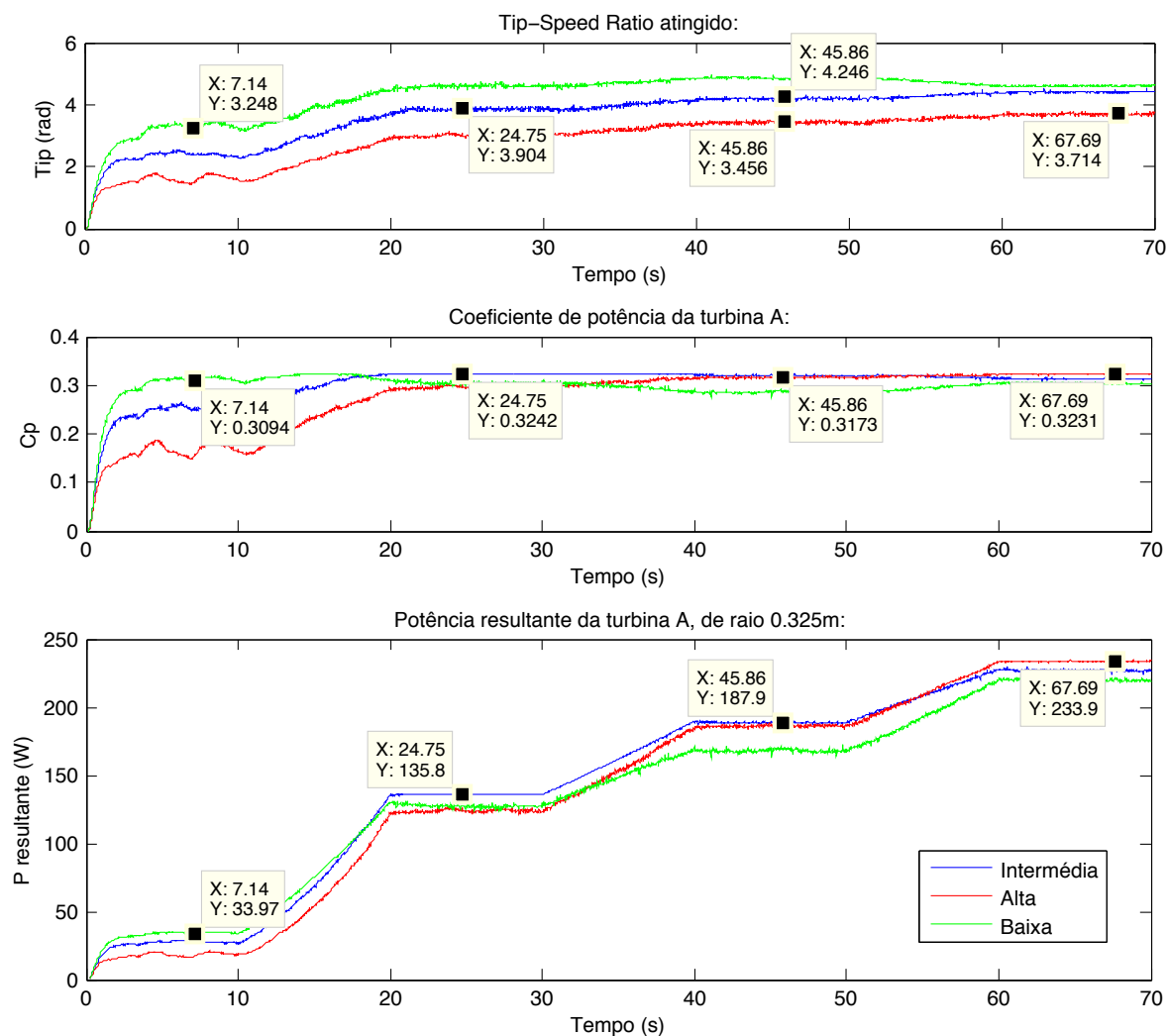


Figura 43 Resultados da simulação da turbina A com raio de 0.325 m perante velocidade de vento variável para três cargas diferentes. *TIP Speed Ratio*, coeficiente de potência e potência.

Para a velocidade de vento de 12.5 m/s é a carga intermédia que se obtém melhores resultados. Com o *TIP* a rondar os 3.9, é precisamente o valor para o qual é atingida a potência máxima, 135.8 W, da turbina A, tal como se pode verificar no gráfico da potência máxima da Figura 40. Como tal, para a velocidade e carga em questão a turbina A gera a sua potência máxima.

Para a velocidade de 14 m/s verifica-se que a potência gerada com as cargas intermédia e alta são muito idênticas, cerca de 188 W. Ainda que tenham um valor de *TIP* bastante diferente, 4.246 e 3.456, respectivamente carga intermédia e carga alta, na curva do coeficiente de potência, Figura 39, correspondem a um valor de coeficiente de potência idêntico. Ao observar-se os gráficos do coeficiente de potência, assim como o da potência, verifica-se que, nas transições de velocidades do vento se passa por momentos em que os coeficientes de potência tomam o mesmo valor para duas cargas distintas, gerando assim

potências iguais nesses mesmos momentos. A carga mais alta produziu uma potência mais elevada para a velocidade de 15 m/s, cerca de 234 W.

Todas estas observações tiradas em relação à potência podiam igualmente ter sido tiradas em relação ao binário. Apenas teriam de ser realizados ensaios propícios, de maneira a ser possível observar-se isso mesmo, ou seja, de maneira a que o *TIP* rondasse o valor 2 no caso do binário máximo para a turbina A.

5.3. ENSAIO DE TURBINAS DIFERENTES COM O MESMO RAIO

Nesta secção comparam-se a turbina A com a turbina B, ambas com um raio de 0.325 m. Na Figura 44, encontram-se representadas as curvas dos coeficientes de binário e de potência para estas duas turbinas.

Como é possível verificar na Figura 44, a turbina A tem os coeficientes de binário e de potência superiores aos da turbina B para valores de *TIP* superiores a 3.37 e vice-versa para valores de *TIP* inferiores a 3.37. Também é possível verificar que, os valores máximos dos coeficientes das duas turbinas são diferentes.

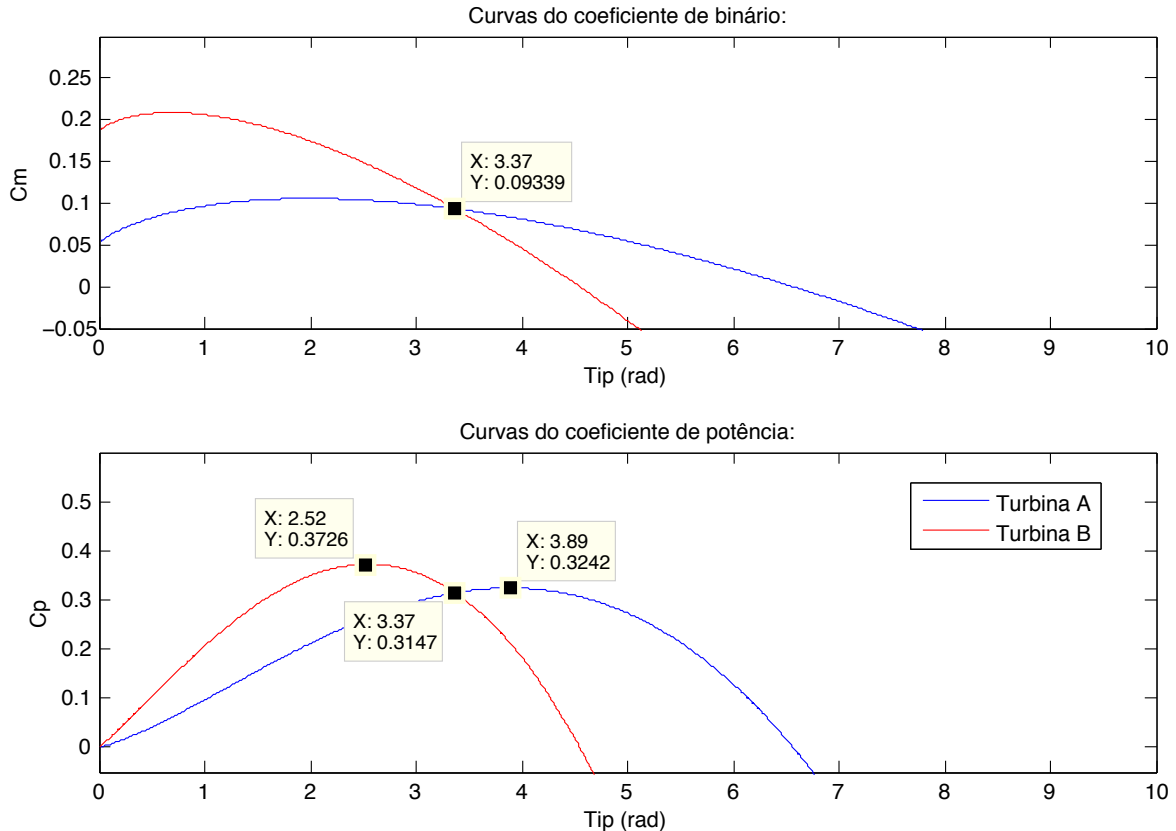


Figura 44 Coeficientes de binário e de potência das A e B.

No entanto, quando a relação entre a velocidade tangencial das pás e a velocidade do vento, TIP , toma o valor de 3.37, os coeficientes igualam-se, tendo-se assim características iguais nessa situação para as duas turbinas.

Realizou-se um ensaio com as duas turbinas com variação linear da velocidade do vento e com uma carga resistiva constante no gerador (carga intermédia), obtendo-se os resultados presentes na Figura 45.

Analisando-se os resultados da simulação da turbina A e da turbina B, Figura 45, verifica-se que, para uma mesma carga e para velocidades do vento baixas, a turbina B, tem melhor desempenho que a turbina A, tal como já foi mencionado na análise às curvas dos coeficientes de potência das turbinas, Figura 44.

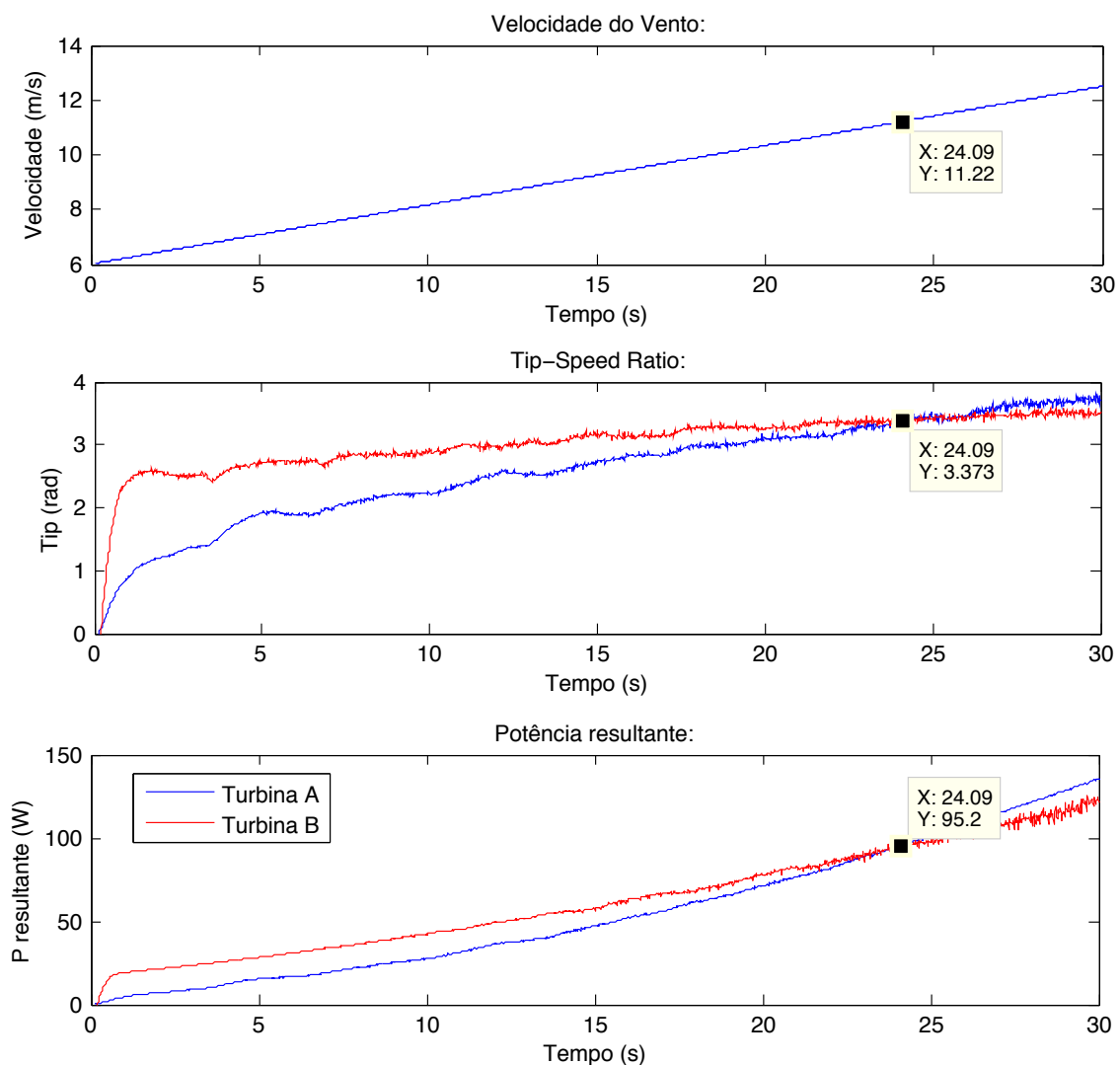


Figura 45 Resultados de simulação para as turbinas A e B perante variação linear da velocidade do vento e para a carga intermédia.

Tal como seria de esperar também, quando ambas as turbinas atingem uma relação de velocidades, *TIP*, igual, ou seja, cerca de 3.37, produzem a mesma potência, cerca de 95 W aos 24 s. A velocidade de vento para a qual é atingido esse *TIP*, varia com a carga. Com uma carga diferente, o valor de *TIP* igual a 3.37 teria sido atingido com velocidades de vento superiores, ou inferiores.

5.4. ENSAIO DE TURBINAS DE DIFERENTE TIPO E RAIO

Neste ensaio é comparado o desempenho de turbinas de diferentes características e com diferentes dimensões. Identificadas como A e C e com raios de 0.325 m e 0.370 m, respectivamente.

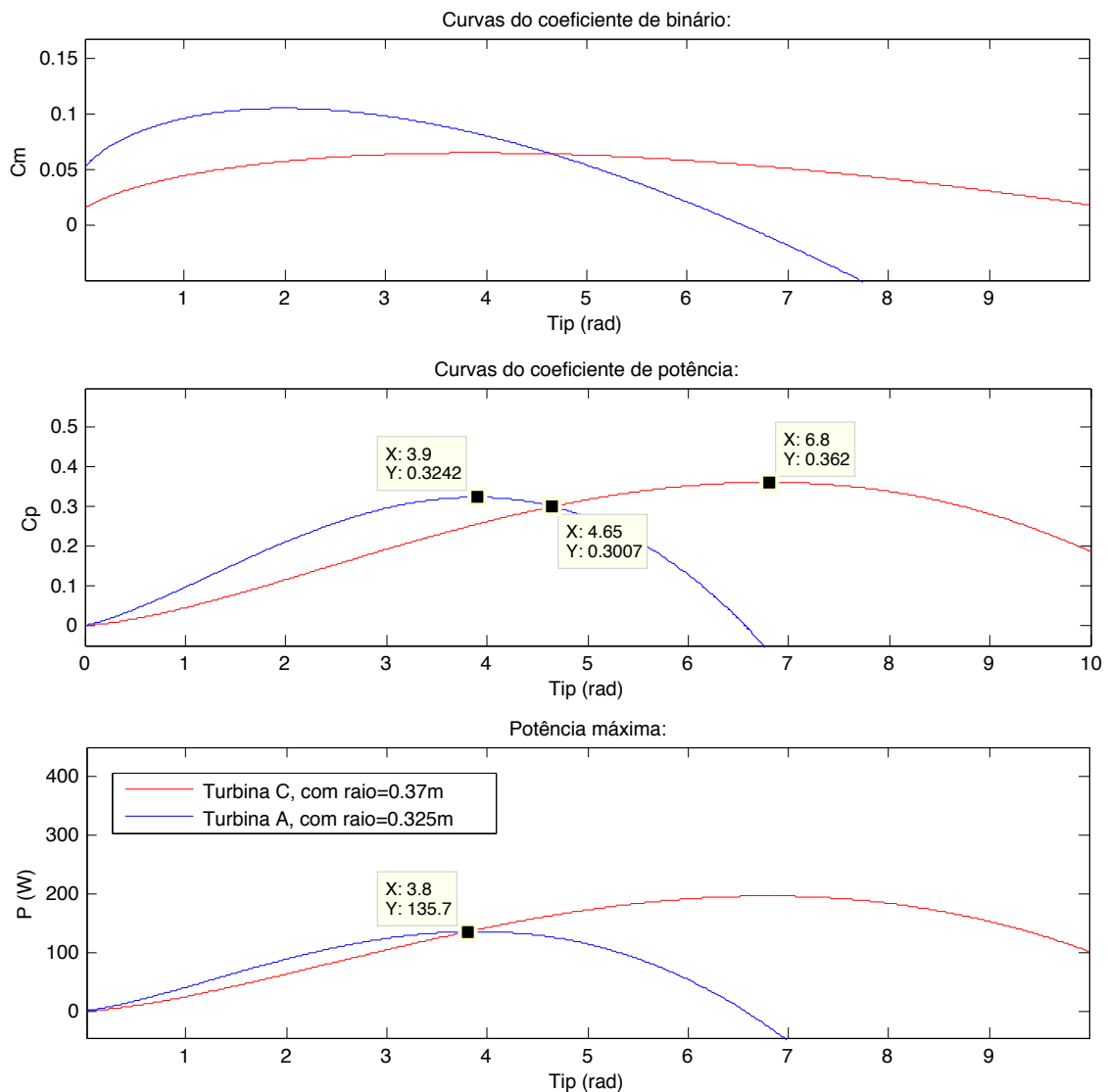


Figura 46 Curvas dos coeficientes de binário e de potência das turbinas A e C e respectivas potências geradas.

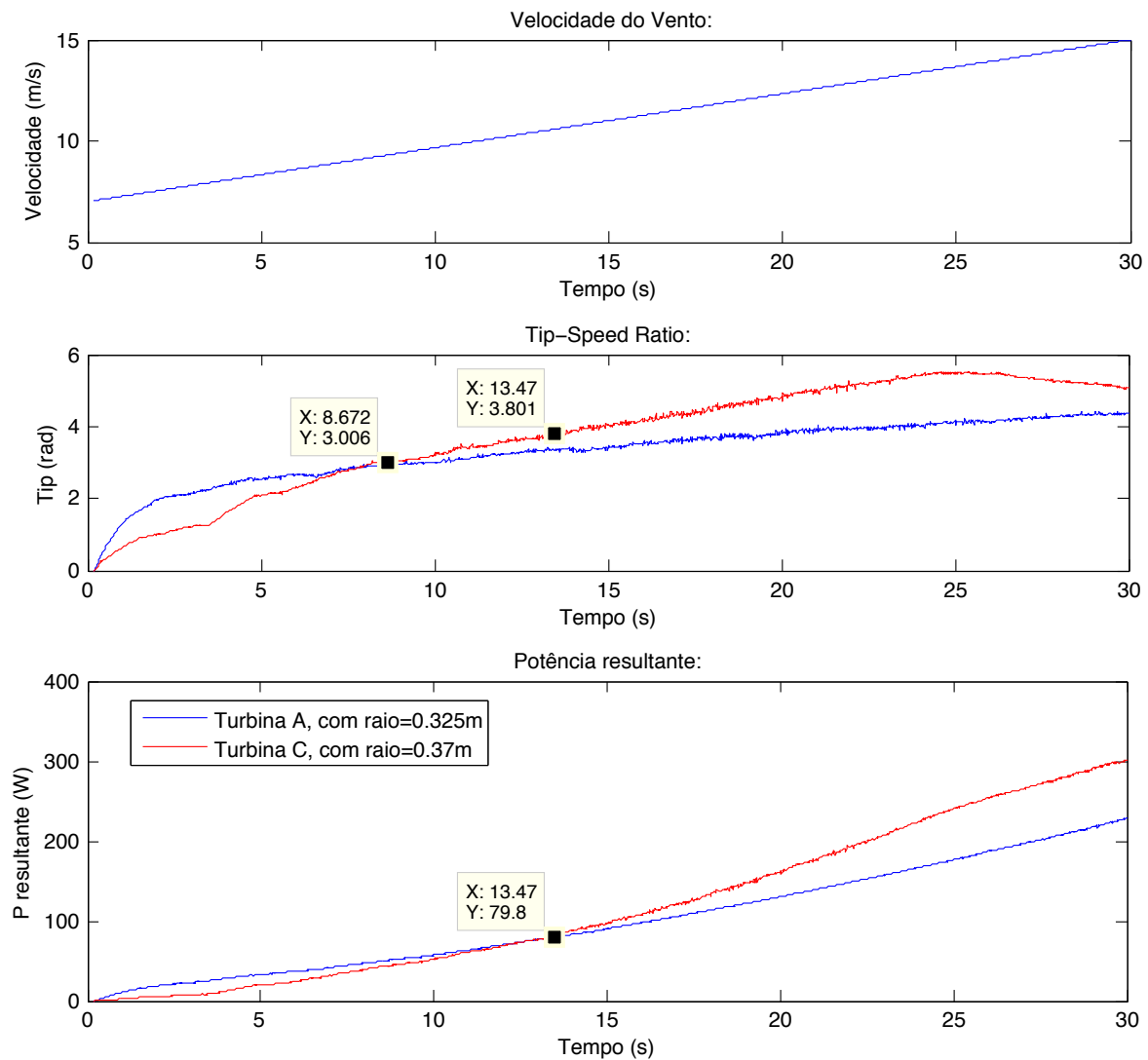


Figura 47 Resultados da simulação da turbina A e da turbina B perante variação linear da velocidade do vento e para a carga intermédia.

É importante reparar que, como o raio é diferente, o instante para o qual as turbinas atingem o mesmo valor de relação entre a velocidade tangencial das pás e a velocidade do vento, *TIP*, cerca de 3 aos 8.6 s, não é o mesmo instante em que as mesmas turbinas atingem um mesmo valor de potência, cerca de 80 W aos 13.5 s, ao contrário do que acontecia nos ensaios anteriores.

Os vários ensaios realizados mostram um desempenho apreciavelmente bom do simulador de vento. Dos referidos dados são extraídas conclusões no seguinte capítulo.

5.5. ANÁLISE GERAL

Os ensaios apresentados neste capítulo reflectem apenas algumas das situações possíveis de simular e avaliar. No entanto, é possível simular diferentes situações, com outros tipos de turbinas e avaliando pormenores diferentes.

A aplicação deste banco de ensaios vai mais além das situações apresentadas neste capítulo. Com ele torna-se possível testar, por exemplo, qual será a melhor turbina, entre um conjunto de turbinas, para uma determinada gama de velocidades de vento e para uma determinada carga.

Outro teste que poderia ser feito é a análise do *TIP* para o qual a potência é máxima para diferentes condições de vento. Controlando o valor do *TIP*, poderá obter-se um melhor rendimento de uma determinada turbina.

Resumindo, tratando-se da optimização de uma turbina ou da carga para uma situação real, este banco de ensaios possibilita a simulação das situações em causa, com vista a obtenção de resultados, que depois de analisados podem conduzir a um melhoramento de eficiência.

6. CONCLUSÕES

Para este trabalho foi importante perceber a origem e visualizar o estado da energia eólica até 2009. O crescimento e evolução da importância desta energia até à data foram factores motivantes para a realização deste trabalho.

Com o estudo teórico foi possível adquirir os princípios físicos da conversão da energia eólica e conhecer o importante valor $16/27$ conhecido por “Limite de Betz”. Com esses princípios teóricos foi possível calcular o binário que uma determinada turbina produziria em determinadas condições de vento e de funcionamento. Com isso, desenvolveu-se um banco de ensaios para micro geração eólica, simulando o vento e aplicando o binário calculado ao gerador através de um motor de corrente contínua.

Foi desenvolvida uma função para a análise de todas as variáveis internas do simulador. Realizaram-se vários ensaios de turbinas com diferentes características e tamanhos, bem como, com diferentes perfis de vento e de carga. Com eles, foi possível comprovar os princípios teóricos estudados e mostrar que é possível simular múltiplas situações obtendo resultados consistentes. Muitos outros ensaios podiam ter sido feitos. No entanto, os testes realizados foram suficientes para a validação do projecto e comprovação do bom desempenho do banco de ensaios.

Com o projecto desenvolvido é possível simular situações reais e ajustar diferentes parâmetros. Torna assim possível eleger a melhor turbina para um determinado local e para determinada carga, sabendo-se as condições ventosas desse local. Por outro lado, é possível também para uma determinada turbina, verificar qual é a carga ideal para cada velocidade do vento, ou seja, verificar qual a carga que provoca uma relação entre a velocidade tangencial da pás e a velocidade do vento, *TIP*, correspondente à potência máxima.

Tudo isto pode ser então simulado em laboratório, com condições controladas. Assim, são dispensados os ensaios no local de implementação, que além dispendiosos, podem ser muito complicados de fazer.

Como trabalho futuro, seria interessante expandir este banco de ensaios com vista à obtenção de um produto didáctico e de apoio ao desenvolvimento. Tal equipamento proporcionaria um melhor e mais rápido desenvolvimento na área da micro geração eólica.

Foi sem dúvida um trabalho interessante do ponto de vista teórico e prático.

Referências Documentais

- [1] GOLDING, E.W - *The Generation of Electricity by Wind Power*, E.& F.N. Spon Ltd. New York, 1977, introduction.
- [2] FIRST HYDROELECTRIC – *Wigderson Library & Pub*,
<http://www.wigderson.com/>.
- [3] BRUSH, Charles F.– *Wikipedia*, imagens.
- [4] RIGHTER, Robert W. - *Wind Energy in America: A History* , *University of Oklahoma Press*, 1996, pág. 44.
- [5] HAU, Erich – *Wind Turbines, Fundamentals, Technologies, Application, Economics*, 2ª Edição, Springer, 2006, pág. 22-26, 40-43.
- [6] NEWS – *Wind Turbine E-126*, <http://www.enercon.de>
- [7] HORNS REV - *Horns Rev offshore wind farm*, <http://www.hornsrev.dk/>
- [8] WINDFLOAT – *EDP associa-se à Principle Power para Eólicas Offshore*,
<http://www.edp.pt/>
- [9] WINDFLOAT – *Turbina flutuante da Principle Power*, <http://wikienergia.com>
- [10] AIRBREEZE – *Foto turbina AirBreeze*, <http://airbreeze.com/>
- [11] EWEA, WIND ENERGY DATA – *Platts PowerVision, January 2010*,
<http://www.ewea.org/>
- [12] PUGA, Ricardo; FERREIRA, Judite – Algoritmo Genérico para Controladores de Geradores Eólicos,.....
- [13] HAU, Erich – *Wind Turbines, Fundamentals, Technologies, Application, Economics*, 2ª Edição, Springer, 2006, pág. 68, 81-89.
- [14] VESTAS – *Vestas wind power*, imagem, <http://www.vestas.com/>
- [15] AIR BREEZE – *Air Breeze marine - small wind, big energy*, imagem,
<http://airbreeze.com/>
- [16] FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY, Charles Jr.; UMANS, Stephen D. – *Electric Machinery*, 6ª edição, pág. 384-389.
- [17] BRUSHED DC ELECTRIC MOTOR - *Wikipedia*, imagens.
- [18] GYULAI, Francis – *Mathematical Models for dynamic study of wind turbines*, 6th International Conference on Hydraulic Machinery and Hydrodynamics Timisoara, Roménia, Outubro de 2004.

Anexo A. Estrutura do ficheiro “.txt” do Vento

Neste anexo encontra-se descrita toda a informação relativa à estrutura que deverá apresentar o ficheiro do vento para que seja carregado correctamente na aplicação.

Estrutura do ficheiro:

O ficheiro deve conter os dados referentes ao vento a ser simulado. Este deve ser preenchido desde a primeira linha, um valor por linha. As configurações possíveis encontram-se a seguir:

- Caso se pretenda por "registo de velocidades por base de tempo":

linha 1: Numero "0", corresponde à opção "registo de velocidades por base de tempo"

linha 2: Duração da base de tempo em segundos

linha 3: Velocidade do vento inicial em m/s

linha 4: Seguinte velocidade de vento em m/s

linha 5: ...

Exemplo:

```
0      // Opção "registo de velocidades por base de tempo"

3      // Duração do base de tempo

8      // Velocidade do vento inicial de 8 m/s

9      // Seguinte velocidade do vento...

10,5   // Seguinte velocidade do vento...
```

O tempo de simulação será igual ao número de velocidades de vento inseridas menos uma, multiplicado pela base de tempo.

Neste caso, teremos uma simulação de $(3-1)*3 = 6$ segundos.

- Caso se pretenda por uma "sinusoidal":

linha 1: Numero "1", correspondente a opção "sinusoidal"

linha 2: Duração da simulação em segundos

linha 3: Valor de "va", da expressão da sinusoidal

linha 4: Valor de "vb", da expressão da sinusoidal

linha 5: Valor de "vc", da expressão da sinusoidal

Exemplo:

```
1      // Opcao "sinusoidal"

30     // Simulacao de 30 segundos

3      // Valor de "Va" = 3

0.5    // valor de "Vb" = 0.5

6      // valor de "Vc" = 6
```

Expressão sinusoidal:

$$Vento = Va * \sin(Vb * 2 * \pi * t) + Vc$$

sendo: "Va", a amplitude da sinusoidal, "Vb", o número de períodos por segundo e "Vc" a constante que representa a velocidade média do vento.

Anexo B. Estrutura do ficheiro “.txt” da Turbina

Neste anexo encontra-se descrita toda a informação relativa à estrutura que deverá apresentar o ficheiro da turbina para que seja carregado correctamente na aplicação.

Estrutura do ficheiro:

- O ficheiro deve conter os dados referentes a turbina a ser simulada. Este deve ser preenchido desde a primeira linha, um valor por linha. As configuração da turbina deve encontrar-se da seguinte forma:

linha 1: c0	[]	Coefficiente da curva do coeficiente mecânico
linha 2: c1	[]	Coefficiente da curva do coeficiente mecânico
linha 3: c2	[]	Coefficiente da curva do coeficiente mecânico
linha 4: alf	[]	Coefficiente da curva do coeficiente mecânico
linha 5: bet	[]	Coefficiente da curva do coeficiente mecânico
linha 6: R	[m]	Raio do rotor da turbina
linha 7: Kd_comp_turb	[(As)/rad]	Constante atrito dinâmico do motor
linha 8: Ke_comp_turb	[Nm]	Constante atrito estático do motor
linha 9: Jm_turb	[kg.m ²]	Momento de inércia do rotor da turbina

Expressão do coeficiente mecânico:

$$Cm = c0 + c1 * \lambda^{(alf-1)} - c2 * \lambda^{(bet-1)}$$

As constantes "Kd_comp_turb" e "Ke_comp_turb", são respectivamente:

$Ta_turb = Kd_comp_turb * Velocidade_angular_rads * km + Ke_comp_turb * km$, onde "Ta_turb" é o binário de atrito da turbina em função da velocidade angular em rads, e "km" [N.m/A] é a constante do motor.

Os valores devem ser apresentados com vírgulas “,” e não com pontos “.”.

Exemplo:

0,0515	[]	Coeficiente da curva do coeficiente mecânico
0,2452	[]	Coeficiente da curva do coeficiente mecânico
0,2	[]	Coeficiente da curva do coeficiente mecânico
2	[]	Coeficiente da curva do coeficiente mecânico
2,125	[]	Coeficiente da curva do coeficiente mecânico
0,575	[m]	Raio do rotor da turbina
0,00074088	[A/(rad/s)]	Constante atrito dinâmico do motor
0,1004	[A]	Constante atrito estático do motor
0,0106	[kg.m ²]	Momento de inércia do rotor da turbina

Anexo C. Código da função “turbina” no Matlab

```

%% Funcao turbina
% Esta funcao carrega os ficheiros "dados.txt" e o "turbina.txt" do
% Visual Studio e realiza o plot de alguns graficos.
%
% INFORMACAO ficheiro "dados.txt":
%
% Coluna: |1          |2 |3          |4          |5 |6 |7 |8 |9 |10
% Dado:   |tSimulacao |dt |Vvento |Vturbinarads |Tip |Tm |Pm |Cm |Cp |Tm_res
%
% Coluna: |11         |12         |13         |14         |15         |16         |17
% Dado:   |Pm_res   |Ta_d_mot   |Ta_e_mot   |Ta_d_turb   |Ta_e_turb   |TJm_mot   |TJm_turb
%
% Coluna: |18         |19         |20         |21         |22
% Dado:   |i_mot_ref |i_mot      |error_i    |intg_error_i_dt |data2[0]
%
% Coluna: |23         |24         |25         |
% Dado:   |Aangular[n][2] |Aangular[n][3] |data1[0] |
%
%
% INFORMACAO ficheiro "turbina.txt" -> nome que deve ser alterado, caso seja
% alterado o nome do ficheiro!!
% Linha1: c0
% Linha2: c1
% Linha3: c2
% Linha4: alf
% Linha5: bet
% Linha6: R
% Linha7: Kd_comp_turb
% Linha8: Ke_comp_turb
% Linha9: Jm_turb

%% function turbina()

clear    %Limpa o workspace

load 'C:\Documents and Settings\Luis\My Documents\Visual Studio 2008\Projects\...
      TESE Luis Carlos Santos 1050380\TESE Luis Carlos Santos 1050380/dados.txt'

%load dados.txt    %Carrega o ficheiro dados.txt

%INDICES do ficheiro "dados.txt"
tSimulacao = 1;    % [s] Tempo de simulacao
dt = 2;            % [s] Tempo entre cada ciclo
Vvento = 3;        % [m/s] Velocidade do vento
Vturbinarads = 4;  % [rad/s] Velocidade de rotacao
Tip = 5;           % [rad] "Tip Speed Ratio", relacao entre a velocidade
                    % tangencial do rotor e a velocidade do vento
Tm = 6;            % [N.m] Binario mecanico
Pm = 7;            % [W] Potencia mecanica
Cm = 8;            % [] Coeficiente mecanico
Cp = 9;            % [] Coeficiente de potencia
Tm_res = 10;       % [N.m] Binario mecanico resultante
Pm_res = 11;       % [W] Potencia mecanica resultante
Ta_d_mot = 12;     % [N.m] Binario de atrito dinamico do motor
Ta_e_mot = 13;     % [N.m] Binario de atrito estatico do motor
Ta_d_turb = 14;    % [N.m] Binario de atrito dinamico da turbina
Ta_e_turb = 15;    % [N.m] Binario de atrito estatico da turbina
TJ_mot = 16;       % [N.m] Binario do momento de inercia do motor
TJ_turb = 17;      % [N.m] Binario do momento de inercia da turbina
i_mot_ref = 18;    % [A] Corrente de referencia

```

```

i_mot = 19; % [A] Corrente no motor
error_i = 20; % [A] Erro entre corrente de referencia e a corrente no
motor
intg_error_i_dt = 21; % [A] Integral do erro entre correntes
data2 = 22; % [V] Tensao de saida da placa para controlo do motor
Aangular2 = 23; % [rad/s^2] Aceleracao angular
Aangular3 = 24; % [rad/s^2] Aceleracao angular filtrada
data1 = 25; % [s] Encoder, medida de cada pulso. Cada volta sao 2000
pulsos.

%INDICES do ficheiro "turbina.txt"
c0 = 1; % [] Coeficiente da curva do Cm
c1 = 2; % [] Coeficiente da curva do Cm
c2 = 3; % [] Coeficiente da curva do Cm
alf = 4; % [] Coeficiente da curva do Cm
bet = 5; % [] Coeficiente da curva do Cm
R = 6; % [m] Raio do rotor da turbina
Kd_comp_turb = 7; % [A/(rad(s))] Constante de atrito dinamico da turbina
Ke_comp_turb = 8; % [A] Constante de atrito estatico da turbina
Jm_turb = 9; % [kg.m^2] Momento de inercia do rotor da turbina

%% GRAFICOS ANALISE GERAL:
figure('Name','An·lise geral','NumberTitle','off')

subplot(331)
plot(dados(:,tSimulacao),dados(:,Vvento))
xlabel('Tempo (s)')
ylabel('Velocidade (m/s)')
title('Velocidade do Vento:')

subplot(332)
plot(dados(:,tSimulacao),dados(:,Vturbinarads))
xlabel('Tempo (s)')
ylabel('Velocidade angular (rad/s)')
title('Rotao da turbina:')

subplot(333)
plot(dados(:,tSimulacao),dados(:,Aangular2))
xlabel('Tempo (s)')
ylabel('Acelerao angular (rad/s^2)')
title('Acelerao angular:')

%FILTRO Acelerao angular:
dt_aux=diff(dados(:,tSimulacao)); % Calcula os intervalos de tempo, delta_t
dt_aux(size(dados(:,tSimulacao))=0; % Ajusta o tamanho do vector

N=20;
for ni=1:size(dados(:,tSimulacao))-2*N
f(ni)=sum(dados(ni:ni+N,Aangular2).*dt_aux(ni:ni+N))/(dados(ni+N,tSimulacao)...
-dados(ni,tSimulacao));
end

f(size(dados(:,tSimulacao))-N:size(dados(:,tSimulacao))=0;

hold on
%plot(dados(:,tSimulacao),f,'y') %plot da acelerao filtrada pelo matlab
plot(dados(:,tSimulacao),dados(:,Aangular3), 'r') %plot da Acelerao filtrada

subplot(334)
plot(dados(:,tSimulacao),dados(:,Cm))
xlabel('Tempo (s)')
ylabel('Cm')
title('Coeficiente de bin·rio f(t):')

subplot(335)
plot(dados(:,Tip),dados(:,Cm))

```

```

xlabel('Tip-Speed')
ylabel('Cm')
title('Coeficiente de binário f(Tip):')

subplot(336)
plot(dados(:,tSimulacao),dados(:,Tm_res))
xlabel('Tempo (s)')
ylabel('T_M resultante (Nm)')
title('Binário resultante:')

subplot(337)
plot(dados(:,tSimulacao),dados(:,i_mot_ref))
xlabel('Tempo (s)')
ylabel('I_r_e_f (A)')
title('Corrente de referência:')

subplot(338)
plot(dados(:,tSimulacao),dados(:,Tip))
xlabel('Tempo (s)')
ylabel('Tip')
title('Tip-Speed Ratio:')

subplot(339)
plot(dados(:,tSimulacao),dados(:,Pm))
xlabel('Tempo (s)')
ylabel('P resultante (W)')
title('Potência resultante:')

%% GRAFICOS CONTROLO DE CORRENTE:
figure('Name','Controlo de corrente','NumberTitle','off')

subplot(221)
plot(dados(:,tSimulacao),dados(:,i_mot_ref))
xlabel('Tempo (s)')
ylabel('I_r_e_f (A)')
title('Corrente de referência:')

subplot(222)
plot(dados(:,tSimulacao),dados(:,i_mot))
xlabel('Tempo (s)')
ylabel('I_m_o_t (A)')
title('Corrente no motor:')

%Filtro da corrente
dt_aux=diff(dados(:,tSimulacao));
dt_aux(size(dados(:,tSimulacao)))=0;

N=20;
for ni=1:size(dados(:,tSimulacao))-2*N
f(ni)=sum(dados(ni:ni+N,i_mot).*dt_aux(ni:ni+N))/(dados(ni+N,tSimulacao)...
-dados(ni,tSimulacao));
end

f(size(dados(:,tSimulacao))-N:size(dados(:,tSimulacao)))=0;

hold on
plot(dados(:,tSimulacao),f,'r')

subplot(223)
plot(dados(:,tSimulacao),dados(:,error_i))
xlabel('Tempo (s)')
ylabel('Erro_i (A)')
title('Erro de corrente:')

%Filtro da error_i

```

```

dt_aux=diff(dados(:,tSimulacao));
dt_aux(size(dados(:,tSimulacao)))=0;

N=20;
for ni=1:size(dados(:,tSimulacao))-2*N
f(ni)=sum(dados(ni:ni+N,error_i).*dt_aux(ni:ni+N))/(dados(ni+N,tSimulacao)...
-dados(ni,tSimulacao));
end

f(size(dados(:,tSimulacao))-N:size(dados(:,tSimulacao)))=0;

hold on
plot(dados(:,tSimulacao),f,'r')

subplot(224)
plot(dados(:,tSimulacao),dados(:,intg_error_i_dt))
xlabel('Tempo (s)')
ylabel('Integral do Erro_i (A)')
title('Erro de corrente integrado:')

%% GRAFICOS ATRITOS E INERCIAS

figure('Name','Atritos e inercias','NumberTitle','off')

subplot(331)
plot(dados(:,tSimulacao),dados(:,Vturbinarads))
xlabel('Tempo (s)')
ylabel('Velocidade angular (rad/s)')
title('Rota da turbina:')

subplot(332)
plot(dados(:,tSimulacao),dados(:,Tm))
xlabel('Tempo (s)')
ylabel('T_M (Nm)')
title('Binário mecânico:')

subplot(333)
plot(dados(:,tSimulacao),dados(:,Tm_res))
xlabel('Tempo (s)')
ylabel('T_M resultante (Nm)')
title('Binário resultante:')

subplot(334)
plot(dados(:,tSimulacao),dados(:,TJ_mot))
xlabel('Tempo (s)')
ylabel('TJ_moto (Nm)')
title('Binário de inércia do motor:')

subplot(335)
plot(dados(:,tSimulacao),dados(:,Ta_e_mot))
xlabel('Tempo (s)')
ylabel('Ta_e_mot (Nm)')
title('Binário de atrito estático do motor:')

subplot(336)
plot(dados(:,tSimulacao),dados(:,Ta_d_mot))
xlabel('Tempo (s)')
ylabel('Ta_d_moto (Nm)')
title('Binário de atrito dinâmico do motor:')

subplot(337)
plot(dados(:,tSimulacao),dados(:,TJ_turb))
xlabel('Tempo (s)')
ylabel('TJ_turb (Nm)')
title('Binário de inércia da turbina:')

```

```

subplot(338)
plot(dados(:,tSimulacao),dados(:,Ta_e_turb))
xlabel('Tempo (s)')
ylabel('Ta_e_turb (Nm)')
title('Binário de atrito estático do turbina:')

subplot(339)
plot(dados(:,tSimulacao),dados(:,Ta_d_turb))
xlabel('Tempo (s)')
ylabel('Ta_d_t_u_r_b (Nm)')
title('Binário de atrito dinâmico da turbina:')

%% GRAFICOS TEMPO DE CICLO E ENCODER

figure('Name','Tempo de ciclo e encoder','NumberTitle','off')

subplot(311)
plot(dados(:,tSimulacao),dados(:,data1))
xlabel('Tempo (s)')
ylabel('Medida do encoder (s)')
title('Encoder:')

subplot(312)
plot(dados(:,tSimulacao),dados(:,Vturbinarads))
xlabel('Tempo (s)')
ylabel('Velocidade angular (rad/s)')
title('Rotação da turbina:')

subplot(313)
plot(dados(:,tSimulacao),dados(:,dt))
xlabel('Tempo (s)')
ylabel('Tempo de ciclo (s)')
title('Tempo de Ciclo:')

%% GRAFICOS CARACTERISTICAS DA TURBINA

figure('Name','Características da turbina','NumberTitle','off')
Data_turb = fopen('Turbina_dados.txt'); %Abre o ficheiro

Data_turb = fopen('C:\Documents and Settings\Luis\My Documents\Visual Studio
2008\...
Projects\TESE Luis Carlos Santos 1050380\TESE Luis Carlos Santos
1050380\turbina1.txt');
data = textscan(Data_turb, '%f') %Copia valores "float"

fclose(Data_turb); %Fecha o ficheiro

%Índices dos valores
c0 = 1;
c1 = 2;
c2 = 3;
alf = 4;
bet = 5;
R = 6; % [m]
Kd_comp_turb = 7; % [As/rad]
Ke_comp_turb = 8; % [Nm]
Jm_turb = 9; % [kgm^2]

%Definições:
Km=0,684; % [Nm/A]
ro=1.2928; % [kg/m^3]
Tip=0:0.01:10;
Vturbinarads=0:0.01:220;
Aturbinarads=0:0.01:1000;
Vvento1=15;
Vvento2=12.5;
Vvento3=10;

```

```

Vvento4=5;

Raio=data{1}(R);

A=pi*Raio^2;

%Calculo do Cm
Cm=data{1}(c0)+data{1}(c1)*Tip.^(data{1}(alf)-1)-data{1}(c2)*Tip.^(data{1}(bet)-1)

%Calculo do Cp
Cp=Cm.*Tip;

%Calculo do Tm MAX para v.rios valores de vento
Tm1 = 1/2.*Cm.*ro*Raio*A*Vvento1^2
Tm2 = 1/2.*Cm.*ro*Raio*A*Vvento2^2
Tm3 = 1/2.*Cm.*ro*Raio*A*Vvento3^2
Tm4 = 1/2.*Cm.*ro*Raio*A*Vvento4^2

%Calculo do Cp MAX para v.rios valores de vento
P1 = 1/2.*Cp.*ro*A*Vvento1^3
P2 = 1/2.*Cp.*ro*A*Vvento2^3
P3 = 1/2.*Cp.*ro*A*Vvento3^3
P4 = 1/2.*Cp.*ro*A*Vvento4^3

%Calculo do bin.rio de atrito da turbina
Ta_turb=data{1}(Kd_comp_turb).*Vturbinarads*Km+data{1}(Ke_comp_turb)*Km;

%Calculo do bin.rio de inÈrcia da turbina
TJ_turb=Aturbinarads.*data{1}(Jm_turb);

%Gr.ficos:
subplot(321)
plot(Tip,Cm)
xlabel('Tip')
ylabel('Cm')
title('Curva do coeficiente de bin.rio:')
axis([0 10 -0.05 0.3])

subplot(322)
plot(Tip,Cp)
xlabel('Tip')
ylabel('Cp')
title('Curva do coeficiente de potÈncia:')
axis([0 10 -0.05 0.6])

subplot(323)
plot(Tip,Tm1,'r')
xlabel('Tip')
ylabel('Tm (Nm)')
title('Bin.rio m.ximo:')

hold on
plot(Tip,Tm2,'b')
plot(Tip,Tm3,'y')
plot(Tip,Tm4,'g')
h = legend('15m/s','12.5m/s','10m/s','5m/s',1)
text(7.5,2,['Raio = ',num2str(Raio),'m'],'EdgeColor','red','LineWidth',3);
axis([0 10 -0.5 15])

subplot(324)
plot(Tip,P1,'r')
xlabel('Tip')
ylabel('P (W)')
title('PotÈncia m.xima:')

hold on
plot(Tip,P2,'b')
plot(Tip,P3,'y')
plot(Tip,P4,'g')

```

```

h = legend('15m/s','12.5m/s','10m/s','5m/s',1);
text(7.5,200,['Raio = ',num2str(Raio),'m'],'EdgeColor','red','LineWidth',3);
axis([0 10 -50 1500])

subplot(325)
plot(Vturbinarads,Ta_turb)
xlabel('Velocidade angular (rad/s)')
ylabel('Ta_t_u_r_b (Nm)')
title('Binário de atrito:')

subplot(326)
plot(Aturbinarads,TJ_turb)
xlabel('Aceleração angular (rad/s^2)')
ylabel('TJ_t_u_r_b (Nm)')
title('Binário de inércia:')

```